



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DO GRAU DE PROTEÇÃO DO AQUÍFERO BARREIRAS EM PERÍMETROS SOB FERTILIZAÇÃO QUÍMICA A PARTIR DE DADOS HIDROGEOFÍSICOS – ÁREA DA BACIA DO RIO CATU-RN

Autor:

ALEXANDRE RICHARDSON OLIVEIRA MONTEIRO

Orientador:

Dr. Leandson Roberto Fernandes de Lucena

DGEF / PPGG / UFRN

Dissertação nº 157/PPGG

**25 de Setembro de 2015
Natal/RN, RN**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DO GRAU DE PROTEÇÃO DO AQUÍFERO BARREIRAS EM PERÍMETROS SOB FERTILIZAÇÃO QUÍMICA A PARTIR DE DADOS HIDROGEOFÍSICOS – ÁREA DA BACIA DO RIO CATU-RN

Autor:

ALEXANDRE RICHARDSON OLIVEIRA MONTEIRO

Dissertação apresentada em 25 de Setembro de 2015, ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN como requisito à obtenção do Título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica com área de concentração Geofísica

Banca Examinadora:

Dr. Leandson Roberto Fernandes de Lucena (DGEF, PPGG, orientador)

Dr. David Lopes de Castro (DG, PPGG, membro interno)

Dr. Valter Antonio Becegato (UDESC, membro externo)

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI

Monteiro, Alexandre Richardson Oliveira.

Análise do grau de proteção do Aquífero Barreiras em
perímetros sob fertilização química a partir de dados
hidrogeofísicos - área da Bacia do Rio Catu-RN / Alexandre
Richardson Oliveira Monteiro. - Natal, 2015.

ix, 110f: il.

Orientador: Dr. Leandson Roberto Fernandes de Lucena.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande
do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-
Graduação em Geodinâmica e Geofísica.

1. Hidrogeofísica. 2. Condutância longitudinal. 3.
Vulnerabilidade. 4. Aquífero Barreiras. 5. Bacia do Rio Catu.
I. Lucena, Leandson Roberto Fernandes de. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 550.3:556

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço imensamente a Deus por toda a conquista alcançada em minha vida acadêmica e pessoal.

A instituição UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte), sobretudo ao Departamento de Geofísica (DEGEF), por oferecer uma estrutura digna de muitos elogios. Além disso, aos professores do DEGEF, em especial ao Dr. Leandson Roberto Fernandes de Lucena, por toda a orientação prestada.

Aos amigos e companheiros de curso que realizaram e disponibilizaram os dados de sondagem elétrica vertical, utilizados neste trabalho, os quais foram executados em torno da área de estudo. Enfatizo o meu obrigado para os professores Leandson Roberto Fernandes de Lucena e Josibel Gomes de Oliveira Júnior, bem como para Alessandro José Soares Dantas, Antônio Lisboa Fernandes Júnior, Marília de Araújo Costa Rodrigues e Daniel Alexsander Silva dos Santos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido ao projeto de pesquisa de número 573462/2008-9, no qual o presente trabalho foi inserido; a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na concessão da bolsa de pesquisa.

Aos meus grandes amigos de projeto de pesquisa, Lucas Miguel Gomes Nunes e Isaac Vinícius Fagundes de Souza, pelo companheirismo e ajuda na rotina de estudo e trabalho na sala dos Pós-graduandos, bem como nos assuntos de cunho pessoal. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

E carinhosamente aos meus pais pela grande assistência proporcionada no meu dia a dia, fazendo o possível para oferecer as melhores condições de rotina pessoal, bem como de estudo.

RESUMO

A utilização de fertilização química em perímetros agricultáveis proporciona um incremento da produtividade, embora eventualmente possa ocasionar uma depreciação qualitativa do manancial hídrico subterrâneo, sobretudo se este for de natureza não confinada. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta resultados referentes a uma análise do grau de proteção natural do Aquífero Barreiras em uma área situada no litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte-Brasil. O referido aquífero é de natureza clástica e possui caráter hidráulico não confinado, fato este que naturalmente lhe confere uma susceptibilidade à contaminação, proveniente de eventuais cargas contaminantes impostas na superfície do terreno. Estes contaminantes estariam associados com a lixiviação de excedentes da fertilização não assimilados pela vegetação. A metodologia utilizada foi fundamentada na utilização conjunta de dados hidrogeofísicos, particularmente de modelos inversos de sondagens elétricas verticais-SEVs e informações de perfis de poços, possibilitando a obtenção de cartografias de condutância longitudinal (S) e vulnerabilidade do aquífero. Essas cartografias foram elaboradas com ênfase para a zona não saturada sobrejacente, ressaltando sobretudo sua espessura e ocorrência de litologias argilosas. Dessa forma, o mapa de condutância longitudinal e vulnerabilidade revelaram áreas mais susceptíveis à contaminação nos setores nordeste e centro-leste da área de estudo, com valores iguais ou inferiores a 10mS e maiores ou iguais a 0,50, respectivamente. Por outro lado, o setor sudoeste mostrou-se menos susceptível à contaminações, com valores de condutância longitudinal e índices de vulnerabilidade maiores ou iguais a 30mS e menores ou iguais a 0,40, respectivamente.

Palavras-chave:

Hidrogeofísica; Condutância longitudinal; Vulnerabilidade; Aquífero Barreiras; Bacia do Rio Catu.

ABSTRACT

The use of chemical fertilization in arable perimeters provides increased productivity, though it can eventually lead to a qualitative depreciation of groundwater sources, especially if such sources are unconfined in nature. In this context, this thesis presents results from an analysis of the level of natural protection of the Barreiras Aquifer in an area located on the eastern coast of the Rio Grande do Norte State - Brazil. Such an aquifer is clastic in nature and has an unconfined hydraulic character, which clearly makes it susceptible to contamination from surface ground loads with contaminants associated with the leaching of excess fertilizers not absorbed by ground vegetation. The methodology used was based on the use of hydro-geophysical data, particularly inverse models of vertical electrical soundings (VES) and information from well profiles, allowing the acquisition of longitudinal conductance cartographies (S), data in mili-Siemens (mS), and the vulnerability of the aquifer. Such maps were prepared with emphasis to the unsaturated overlying zone, highlighting in particular its thickness and occurrence of clay lithologies. Thus, the longitudinal conductance and aquifer vulnerability reveal areas more susceptible to contamination in the northeast and east-central sections of the study area, with values equal to or less than 10mS and greater than or equal to 0,50, respectively. On the other hand, the southwestern section proved to be less susceptible to contamination, whose longitudinal conductance and vulnerability indices are greater than or equal to 30mS and less than or equal to 0,40, respectively.

Keywords:

Hydrogeophysics; longitudinal conductance; vulnerability; Barreiras Aquifer; River Catu basin.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
LISTA DE FIGURAS E TABELAS	vii
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	01
1.1 – Contextualização do tema abordado	01
1.2 – Identificação da área em estudo e aspectos socioeconômicos	02
1.3 – Objetivos	03
2 CONTAMINAÇÃO E ANÁLISE DA PROTEÇÃO DE AQÜÍFEROS EM PERÍMETROS AGRICULTÁVEIS	04
2.1 – Recursos hídricos – definições e contextualização socioambiental	04
2.2 – Bacia hidrográfica	05
2.3 – Sistemas aquíferos	05
2.4 – Agricultura irrigada e a contaminação de aquíferos	08
<i>2.4.1 – Tipos de contaminação de aquíferos</i>	<i>09</i>
<i>2.4.2 – Adubação química</i>	<i>10</i>
<i>2.4.3 – Ciclo do nitrogênio</i>	<i>10</i>
2.5 – Vulnerabilidade dos sistemas aquíferos	11
<i>2.5.1 – Método para avaliação dos índices de vulnerabilidade</i>	<i>12</i>
<i>2.5.2 – Limitações dos mapas de vulnerabilidade</i>	<i>13</i>
2.6 – Contribuição da geofísica na análise do grau de proteção de aquíferos	14
3 CONTEXTO GEOLÓGICO	16
3.1 – Litoestratigrafia regional	16
<i>3.1.1 – Sequência não aflorante</i>	<i>16</i>

3.1.2 – Sequência aflorante	16
3.2 – Contexto tectônico	18
4 CONTEXTO HIDROLÓGICO	20
4.1 – Aquífero Barreiras	20
4.1.1 – Potenciometria da área	21
4.1.2 – Aspectos físico-químicos	23
4.2 – Bacia hidrográfica do Rio Catu – RN	24
5 METODOLOGIA EMPREGADA	26
5.1 – Método da eletrorresistividade	26
5.1.1 – Técnica da Sondagem Elétrica Vertical	28
5.1.2 – Calibração geolétrica	29
5.1.3 – Equipamento e softwares utilizados	32
5.1.4 – Parâmetros e função de Dar Zarrouk condutância longitudinal “S”	33
5.2 – Metodologia G.O.D para análise de vulnerabilidade de aquíferos	35
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
6.1 – Dados de poços	37
6.2 – Dados de sondagens elétricas verticais (SEV’s) disponibilizadas	39
6.3 – Condutância longitudinal (S) e análise do grau de proteção intrínseca do aquífero.	49
6.3.1 – Mapa de condutância longitudinal	50
6.3.2 – Classificação do grau de proteção intrínseca do aquífero	53
6.4 – Proposta do mapa de vulnerabilidade segundo a metodologia GOD a partir de dados de poços e geoeletricos	55
6.5 – Análise conjunta dos mapas de S, de vulnerabilidade natural e isoconcentrações de nitrato	61
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63

REFERÊNCIAS	65
ANEXO – Perfis de poços tubulares utilizados	71
APÊNDICE – Artigo submetido para publicação em periódico indexado	85

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área da bacia hidrográfica do Rio Catu–RN, abrangendo partes dos municípios de Goianinha, Canguaretama, Tibau do Sul e Vila Flor	02
Figura 2: Representação esquemática do subsolo mostrando as diversas zonas de umidade (adaptado de Bear & Verruit, 1987)	06
Figura 3: Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos (adaptado de Bear & Verruit, 1987)	07
Figura 4: Distintos cenários envolvendo contaminação de aquíferos rasos em perímetros agricultáveis: A. zona não saturada delgada, facilitando o acesso do contaminante ao aquífero; B. zona não saturada espessa, dificultando a contaminação das águas subterrâneas; C. zona não saturada com percentual litológico argilosos, favorecendo a proteção do aquíferos	09
Figura 5: Ciclo do nitrogênio de forma esquemática, mostrando o processo de transformação química do nitrogênio (adaptado de Martinelli, 2007)	11
Figura 6: Unidades estratigráficas para a área da bacia do Rio Catu-RN (adaptado de Lucena, 2005)	17
Figura 7: Esboço geológico da área da bacia hidrográfica do Rio Catu–RN e adjacências (adaptado de Angelim <i>et al.</i> , 2006)	19
Figura 8: Mapa potenciométrico do Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Catu-RN	23
Figura 9: Mapa de isoconcentrações de nitrato (NO ₃ -), área da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN (adaptado de Lucena <i>et al.</i> , 2013a).	24
Figura 10: Esquema de aquisição da sondagem elétrica vertical (adaptado de Reynolds, 1997)	28
Figura 11: Localização da sondagem elétrica de calibração no loteamento de Sonho Verde, em Paranamirim – RN, executada por Lucena (2005)	30
Figura 12: Curva de resistividade aparente referente à SEV utilizada para a calibração geoeletrica e respectivo modelo geoeletrico inverso interpretado (adaptado de Lucena, 2005)	30
Figura 13: Perfil litológico de poço e hidroestratigrafia geoeletrica de calibração; o nível estático (NE) encontra-se a 16,0 metros de profundidade; adaptado de Lucena (2005)	31
Figura 14: Resistivímetro tipo GeoTest RD-300B	33

Figura 15: Esquema de propagação da corrente elétrica no subsolo para um aquífero multicamadas. O fluxo elétrico paralelo a estratificação é atribuído ao cálculo da condutância longitudinal (adaptado de Orellana, 1972)	33
Figura 16: Fluxograma para obtenção do índice de vulnerabilidade natural de aquíferos, conforme metodologia GOD (Foster <i>et al.</i> , 2006)	36
Figura 17: Localização dos poços com perfil litológico e de sondagens geoeletricas (imagem de satélite disponibilizada pela SEMARH-RN)	39
Figura 18: SEV – 01	41
Figura 19: SEV – 02	42
Figura 20: SEV – 03	42
Figura 21: SEV – 04	43
Figura 22: SEV – 05	43
Figura 23: SEV – 06	44
Figura 24: SEV – 07	44
Figura 25: SEV – 08	45
Figura 26: SEV – 09	45
Figura 27: SEV – 10	46
Figura 28: SEV – 11	46
Figura 29: SEV – 12	47
Figura 30: SEV – 13	47
Figura 31: SEV – 14	48
Figura 32: SEV – 15	48
Figura 33: SEV – 16	49
Figura 34: Mapa de condutância longitudinal (S) da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN. As isolinhas apresentam os valores de S em mS (10^{-3} Siemens)	51
Figura 35: Mapa de espessura da zona não saturada (ZNS) da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN.	52
Figura 36: Subáreas mais susceptíveis a contaminação do Aquífero Barreiras, com base na análise do parâmetro geoeletrico condutância longitudinal	53
Figura 37: Classificação do grau de proteção intrínseca do Aquífero Barreiras (Alto, Intermediário e Baixo) para o contexto hidrogeológico da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN (adaptado de Braga, 2008).	55
Figura 38: Mapa do índice paramétrico “G” (relacionado ao tipo de ocorrência do aquífero)	58
Figura 39: Mapa do índice paramétrico “O” (relacionado à composição litológica da ZNS)	59

Figura 40: Mapa do índice paramétrico “D” (relacionado à espessura da ZNS)	59
Figura 41: Mapa do índice de vulnerabilidade do Aquífero Barreiras, fundamentado na metodologia GOD (Foster e Hirata, 1993), na área da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN	60
Figura 42: Áreas mais susceptíveis a contaminação antrópica na bacia hidrográfica do Rio Catu – RN, baseado na metodologia GOD (imagem de satélite disponibilizada pela SEMARH-RN)	61
LISTA DE TABELAS	63
Tabela 1: Poços utilizados para a determinação da potenciometria do Aquífero Barreiras na área da bacia hidrográfica do Rio Catu – RN	22
Tabela 2: Associação dos intervalos de resistividade aparente com as características litológicas, para o contexto que envolve a zona não saturada sobreposta ao Aquífero Barreiras	32
Tabela 3: Localizações geográficas dos poços e os respectivos valores de espessuras da zona não saturada (ZNS) na área da bacia do Rio Catu-RN e adjacências	38
Tabela 4: Localização geográfica das 16 SEV’s disponibilizadas com seus respectivos valores de espessura da zona não saturada interpretada	40
Tabela 5: Condutância longitudinal (S) das SEV’s analisadas neste estudo, referente à zona não saturada.	50
Tabela 6: Fatores de ponderação do método GOD, associados com os intervalos de resistividade aparente e características do meio considerado.	56
Tabela 7: Pesos atribuídos e índices GOD de vulnerabilidade local para poços e SEV’s; os parâmetros “G”, “O” e “D” se referem ao tipo de ocorrência do aquífero, tipo de litologia da ZNS e profundidade do nível freático ou espessura da ZNS, respectivamente	57

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Contextualização do tema abordado

A água representa um recurso natural imprescindível à existência de vida no planeta, sendo utilizada em diversas atividades e mediante intensidades crescentes, conforme a necessidade de atender a demanda populacional. Contudo, a sua utilização de forma imprudente, seja em termos quantitativos, seja em termos qualitativos e sem planejamento quanto a sua preservação, acarreta sérios impactos sócio-ambientais, sobretudo quando se considera seu consumo de forma direta ou mediante um simples tratamento primário.

Dentre a vasta literatura disponível (Fetter, 1993; Custódio & Llamas, 1983), têm-se relatos da influência da utilização de agroquímicos no tocante à degradação qualitativa de mananciais subterrâneos, sobretudo de fertilizantes. Não raro, perímetros agrícolas demandam elevadas quantidades de águas para irrigação, bem como de substanciais quantitativos de fertilização química, incluindo compostos nitrogenados. Excedentes químicos destes compostos na sua forma mais oxidada (nitrato), não assimilados pela cobertura vegetal, podem eventualmente atingir a zonas aquíferas, sobretudo a superfície livre das águas nos aquíferos não confinados. Dessa forma, verifica-se que a fertirrigação desempenha um papel importante na produtividade agrícola, possibilitando o desenvolvimento econômico da região, embora sua prática intensiva e de forma aleatória possa ocasionar sérios problemas ambientais relacionados à qualidade das águas subterrâneas para o consumo humano. Em linhas gerais, tem-se a importância da adubação em termos de produtividade, mas com um incremento do risco de contaminação de mananciais subterrâneos (Lucena *et al.*, 2013a).

Nesse contexto, o presente trabalho aborda estudos voltados à análise do grau de proteção e vulnerabilidade de aquíferos, tomando os levantamentos geoeletricos como metodologia adicional e complementar, revelando-se em uma importante ferramenta auxiliar de gestão hidrogeoes ambiental sustentável de perímetros irrigados. Dessa forma, ressalta-se que tais estudos podem contribuir para o planejamento e execução de ações preventivas frente a futuras contaminações, bem como minimizar ameaças provenientes de atividades presentes.

1.2. Identificação da área em estudo e aspectos socioeconômicos

Localizada no litoral leste do Rio Grande do Norte (nordeste brasileiro), a bacia hidrográfica do Rio Catu abrange uma área de aproximadamente 200km², ocupando partes dos municípios de Canguaretama, Goianinha, Tibau do Sul e Vila Flor (Figura 1).

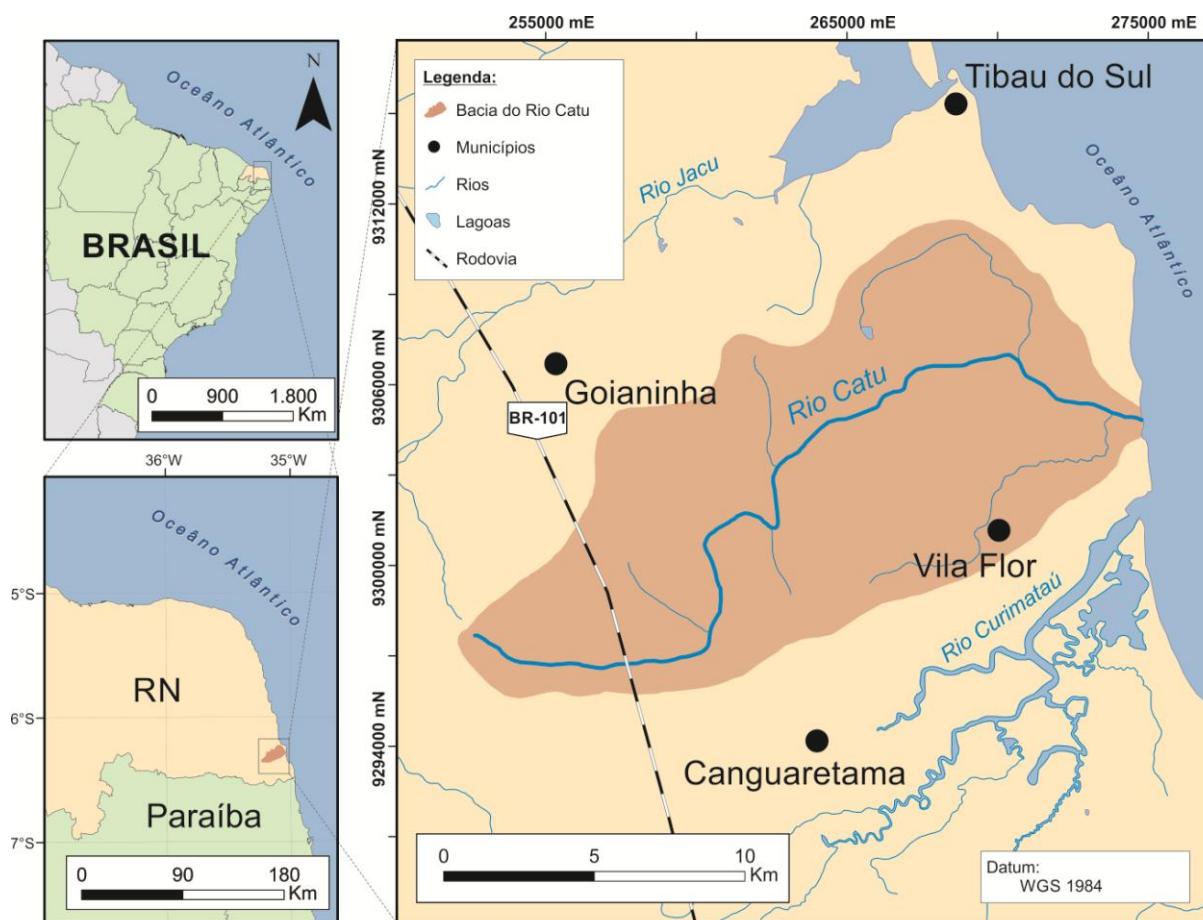


Figura 1: Localização da área da bacia hidrográfica do Rio Catu–RN, abrangendo partes dos municípios de Goianinha, Canguaretama, Tibau do Sul e Vila Flor.

Essa área possui predominância de um clima tropical chuvoso, correspondendo ao tipo AS' da classificação climática de Köppen (SERHID, 1998), com concentração das precipitações anuais ocorrendo durante os meses de março a julho. Os índices pluviométricos anuais em termos de média histórica mostram-se decrescentes do litoral para o interior, passando de aproximadamente 1.400mm na foz, para cerca de 1.055mm nas cabeceiras (SERHID, 1998). Sua vegetação é representada por três formações principais: a vegetação dos manguezais, a vegetação das praias e dunas e floresta tropical subperenifólia, associada à denominada mata atlântica. O relevo da bacia do Rio Catu compreende as planícies fluviais, as planícies costeiras/dunas e tabuleiros costeiros (CPRM, 2010), sendo estes últimos com maior representatividade na área de estudo. De modo geral, essa bacia é constituída por classes de solos Podzólicos Vermelho-Amarelado Eutrófico (37,6%), Areias Quartzozas

Distróficas (33,1%), Latossolo Amarelo Distrófico (28,4%) e Lagoas (1,9%), que são inteiramente utilizadas para a agricultura, exceto as áreas ocupadas pelas lagoas (SERHID, 1998).

Em termos de atividades sócio-econômicas, destacam-se aquelas voltadas para o turismo, a carcinicultura e a agricultura, com culturas de coco da bahia, mandioca, banana, manga e, sobretudo, a cana-de-açúcar, sendo esta última destinada à agroindústria (produção de açúcar e etanol). Em termos de uso e ocupação do solo, a agricultura representa cerca de 99% de toda a área da bacia, sendo aproximadamente 90% ocupado apenas pela cana-de-açúcar (SERHID, 1998).

Por outro lado, em termos de abastecimento público, dados da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) revelam que, praticamente, a totalidade das localidades urbanas e rurais locais é abastecida por água subterrânea originária de aquíferos rasos, particularmente do sistema Aquífero Dunas-Barreiras. Já os grandes perímetros canavieiros, por sua vez, possuem seus sistemas de irrigação provenientes principalmente de captações das drenagens superficiais.

1.3. Objetivos

Diante do contexto reportado nos tópicos anteriores, a presente pesquisa possui como objetivos primordiais quantificar o grau de proteção e a vulnerabilidade do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras na área da bacia do Rio Catu-RN. Essa quantificação será realizada com a elaboração de cartografias fundamentadas na metodologia de análise de vulnerabilidade GOD proposta por Foster & Hirata (1988) e aplicação de parâmetros geoeletricos derivados de modelos inversos de sondagens elétricas verticais, identificando áreas na referida bacia onde o aquífero é mais protegido ou mais susceptível a contaminações impostas em superfície.

CAPÍTULO 2 – CONTAMINAÇÃO E ANÁLISE DA PROTEÇÃO DE AQUÍFEROS EM PERÍMETROS AGRICULTÁVEIS

Considerando o caráter multidisciplinar do presente estudo, alguns aspectos prévios envolvendo definições gerais e contextualizações da temática abordada serão relatadas neste capítulo, as quais são tratadas nos tópicos seguintes.

2.1. Recursos hídricos – definições e contextualização socioambiental

A importância da água envolve um conceito bastante amplo por tratar-se de um recurso indispensável na questão social, econômica e ambiental.

De acordo com informações inseridas no site da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), a água doce representa tão somente cerca de 2,8% de toda a água disponível no planeta, e deste montante apenas cerca de 22,4% mostra-se disponível para o consumo humano, sendo 0,4% envolvendo águas superficiais e aproximadamente 22% associados a mananciais subterrâneos. Somado a isso, sua ocorrência e distribuição geográfica mostram-se bastante variáveis, uma vez que estes mananciais superficiais e subterrâneos se interrelacionam no ciclo hidrológico, além de dependerem das condições climatológicas. O aproveitamento das águas subterrâneas vem aumentando conforme o aperfeiçoamento das técnicas de construção de poços e dos métodos de bombeamento, obtendo mais eficácia na captação de água, ainda conforme a ABAS.

A Organização das Nações Unidas (ONU), por sua vez, afirma que mais de 748 milhões de pessoas (cerca de 18% da população mundial) são carentes quanto ao consumo de água potável de qualidade. Além disso, o Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Água 2015 (UNESCO, 2015) alerta que em 2030 o planeta enfrentará um déficit de água de aproximadamente 40% de suas necessidades, a menos que seja melhorada dramaticamente a gestão desse recurso natural.

Diante desse contexto, comprova-se que o setor de exploração dos recursos hídricos ainda carece de métodos e técnicas que favoreçam a utilização racional em prol do crescimento econômico e do bem estar social, seja em termos quantitativos, seja em termos qualitativos.

2.2. Bacia hidrográfica

A Política Nacional dos Recursos Hídricos adota o conceito de bacia hidrográfica (ou bacia de drenagem) como uma unidade de planejamento na gestão dos recursos hídricos. Dentre várias definições de bacia hidrográfica, Tucci (1993) considera como sendo “uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exultório. Ela compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exultório”. Alternativamente, a bacia de drenagem pode ser entendida como uma área topograficamente definida, na qual possui drenagem caracterizada por rios e/ou riachos em que todo o deflúvio (água de chuvas de escoamento superficial) é escoado através de uma única saída (Feitosa *et al.*, 2008)

A referida terminologia caracteriza a área de estudo das águas superficiais, embora o contexto das águas subterrâneas não possua uma delimitação de área específica, visto que os aquíferos são estendidos como estruturas que retém água infiltrada e podem ter prolongamentos além de fronteiras delimitas por senso político.

A Bacia Hidrográfica do Rio Catu-RN foi particularmente selecionada para desenvolvimento da presente pesquisa devido à carência de estudos que possam subsidiar uma gestão hidrogeoambiental local sustentável, considerando o amplo cultivo da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, do aporte natural de adubação química no solo (Lucena *et al.*, 2013a). Ressalta-se ainda o caráter efluente dessa rede de drenagem em relação às águas subterrâneas, sendo estas últimas responsáveis pelo regime perene dos rios da área em seus fluxos de base, sobretudo nos meses de estiagem.

2.3. Sistemas aquíferos

De forma geral, considera-se que o solo é constituído de uma matriz porosa composta por partículas sólidas e por espaços vazios (poros), que podem ou não estarem preenchidos por água. Dessa forma e em linhas gerais, tem-se uma hidroestratigrafia na sua forma mais simplista, constituída por uma zona saturada (também chamado de lençol freático, formação aquífera, reservatório de água subterrânea ou, simplesmente, aquífero) e outra não saturada (também chamada de zona vadosa, insaturada ou de aeração), conforme esquematizada na Figura 2.

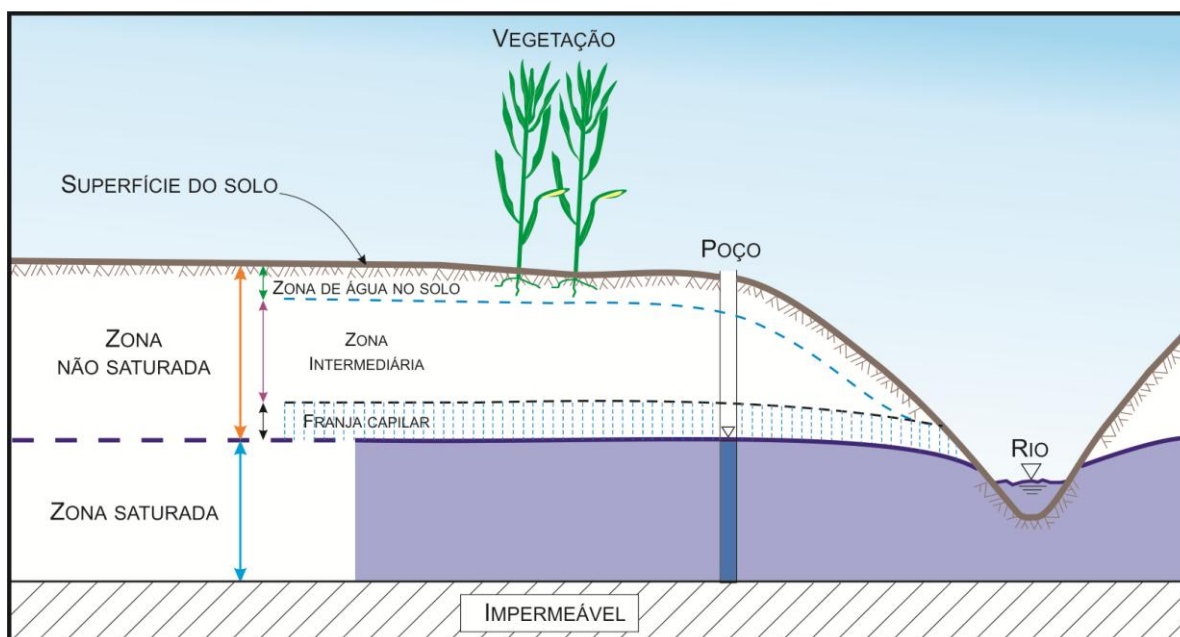


Figura 2– Representação esquemática do subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade (adaptado de Bear & Verruit, 1987).

A zona saturada possui seus espaços vazios preenchidos por água, caracterizando a ocorrência do aquífero. Denomina-se aquífero aquela litologia que além de conter água nos poros, permita uma boa transmissão de água armazenada. Para isso, essa litologia deve ser porosa e permeável, capaz de ceder água economicamente viável para exploração. Esta zona é limitada em sua porção inferior por um embasamento hidrogeológico, caracterizado normalmente por ser um meio impermeável ou semi-impermeável (Feitosa *et al.*, 2008).

A zona vadosa, foco do presente trabalho para análise da vulnerabilidade, é a ligação entre a ocorrência de águas subterrâneas e a atmosfera, em que os poros são preenchidos parcialmente por água e ar. Esta zona divide-se basicamente em três horizontes, denominados de zona de água do solo (ou zona de evapotranspiração), zona intermediária e franja capilar (Feitosa *et al.*, 2008):

- Zona de água no solo: compreende a faixa mais superficial do terreno, limitada a baixo pelo alcance das raízes das plantas, onde estas utilizam para a transpiração e nutrição;
- Zona intermediária: possui limite superior e inferior caracterizado pelo alcance das raízes das plantas e pela franja capilar, respectivamente, sendo a umidade proveniente de água capilar isolada, fora do alcance das raízes, e de água retida por forças não capilares;

- Franja capilar: situa-se entre a superfície freática e o limite de ascensão capilar da água, sendo sua espessura variável e dependente da distribuição e tamanho dos poros, além da homogeneidade do terreno, não raro apresentando um índice de saturação da ordem de 75%.

As características litológicas da zona de aeração são determinantes na avaliação do potencial de recarga ou reabastecimento dos aquíferos por meio da infiltração das águas pluviais. Além disso, o meio insaturado exerce a função de proteção física do meio aquífero frente a substâncias contaminantes lançadas na superfície do terreno. Sua eficácia como barreira protetora decorrerá principalmente de sua constituição litológica e espessura, os quais determinarão se a carga contaminante irá ou não atingir o lençol freático e com potencial poluidor.

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com a pressão das águas nas superfícies limítrofes de topo e base (Figura 3). Baseando-se nesse parâmetro, têm-se os seguintes tipos (Custódio & Llamas, 1983; Feitosa *et al.*, 2008):

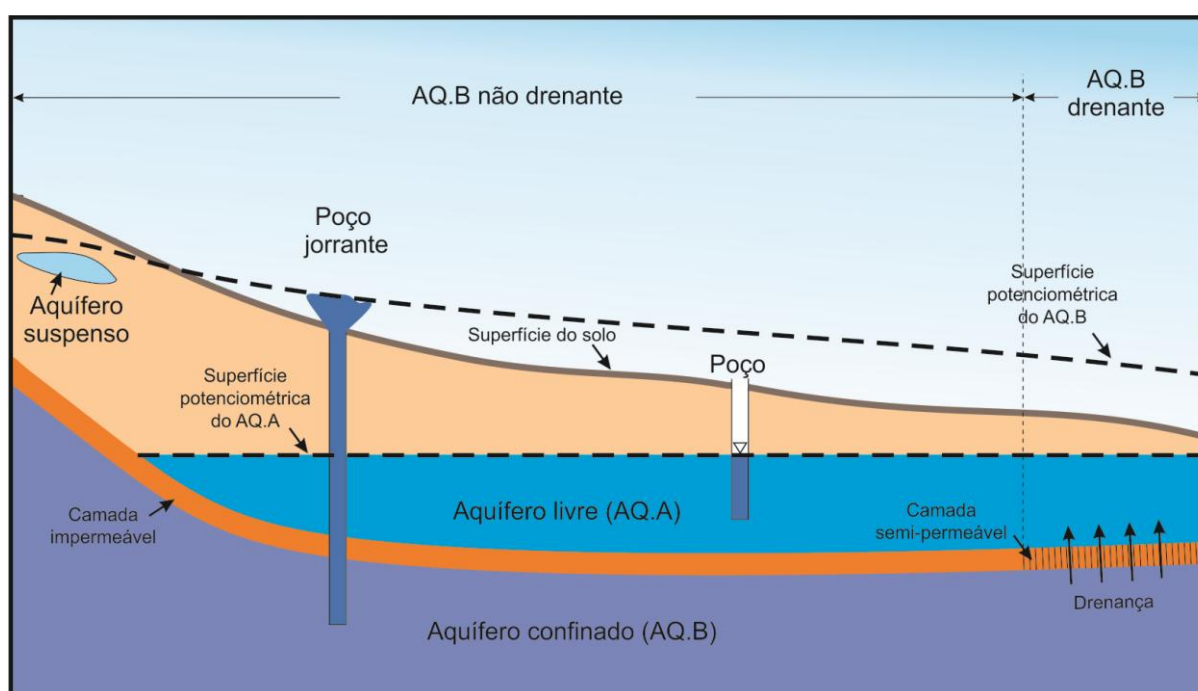


Figura 3 – Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos (adaptado de Bear & Verruit, 1987)

- Aquíferos confinados (aquíferos sob pressão): a pressão no topo é maior que a pressão atmosférica, podendo tratar-se de aquíferos confinados drenantes (uma das camadas limítrofes é semi-permeável permitindo fluxo pelo topo ou base) ou não drenantes (camadas superior e inferior são impermeáveis);

-
- Aquíferos livres (aquíferos freáticos ou não confinados): a pressão no topo é representada pela pressão atmosférica, podendo ser também classificados como drenantes (base semipermeável) e não drenantes (base impermeável).

As áreas de recargas dos aquíferos confinados correspondem a aquíferos livres, em que os excessos de água da chuva penetram no solo por infiltração.

2.4. Agricultura irrigada e a contaminação de aquíferos

A contaminação de águas e, particularmente, de aquíferos, representa um segmento bastante amplo nas geociências. Feitosa *et al.* (2008), contudo, ressaltam preliminarmente conceitos de água contaminada e água poluída, podendo serem designadas, respectivamente:

- Água poluída: conceito dependente do ponto de vista que se enquadra, de forma que a água pode ser qualificada como poluída para certo fim e não para outro; considerando sua utilização na agricultura, a água pode ser poluída se ela apresentar excessivo de sódio e/ou salinidade elevada ao ponto de comprometer a produção de determinada cultura;
- Água contaminada: conceito dependente exclusivamente para fins de consumo humano, onde esta é caracterizada por apresentar organismos patogênicos, substâncias tóxicas e/ou radioativas, em teores prejudiciais a saúde humana.

As origens de contaminações das águas subterrâneas podem ser principalmente oriundas de atividades industriais, domésticas e agrícolas. O presente caso em estudo envolve as atividades agrícolas que são amplamente exploradas na área da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN, conforme reportado por Lucena *et al.* (2013a).

Em linhas gerais, pode-se avaliar que o contexto envolvendo a agricultura irrigada como ameaça às águas subterrâneas apresenta três situações ambientais, considerando uma mesma quantidade de água para irrigação e de adubação química, conforme diferentes características do solo sobreposto ao aquífero (Figura 4):

- (A) Zona vadosa relativamente delgada sem compostos argilosos que possam retardar a percolação do contaminante, proporcionando um baixo grau de proteção;
- (B) Zona vadosa com composição predominantemente arenosa, semelhante ao anterior, porém mais espessa, proporcionando um grau de proteção maior que àquela reportada em "A";

(C) Zona vadosa com compostos argilosos intercalados, os quais são capazes de retardar o avanço de contaminantes lixiviados.

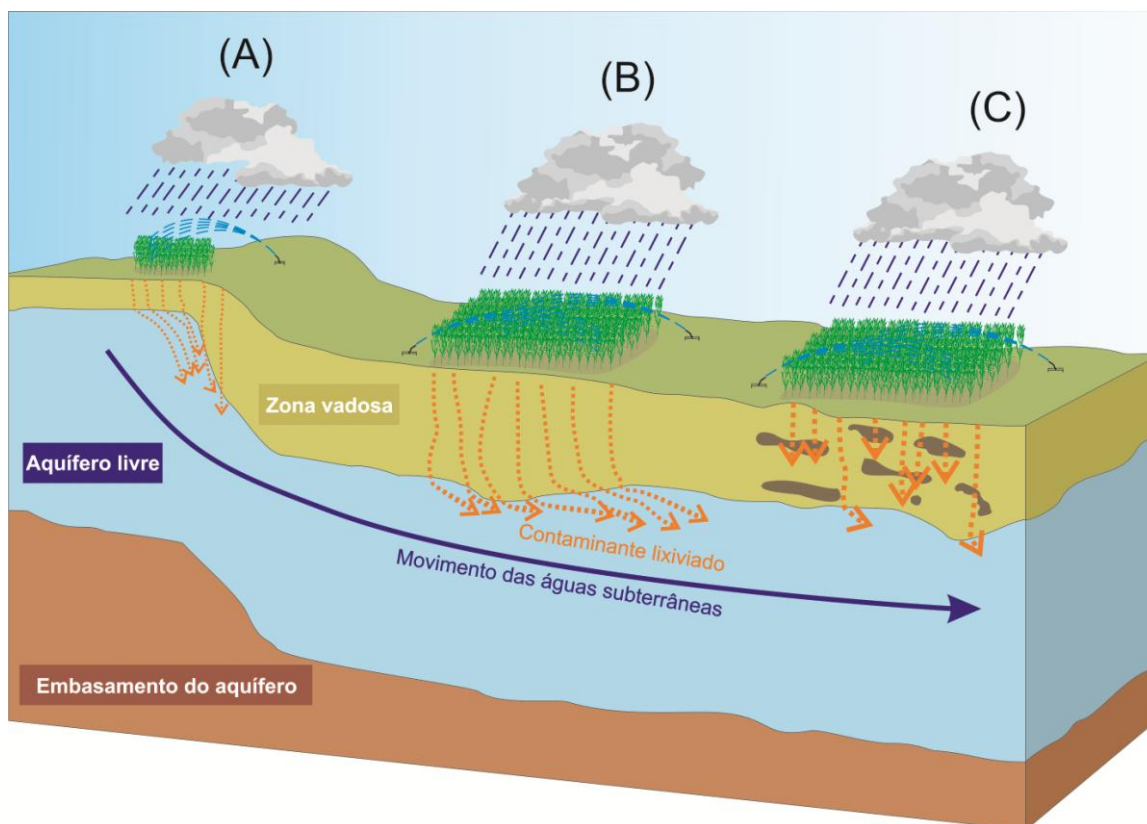


Figura 4: Distintos cenários envolvendo contaminação de aquíferos rasos em perímetros agricultáveis: (A) zona não saturada delgada, facilitando o acesso do contaminante ao aquífero; (B) zona não saturada espessa, dificultando a contaminação das águas subterrâneas; (C) zona não saturada com percentual litológico argiloso, favorecendo a proteção do aquíferos.

Para este tipo de análise, considera-se que a carga contaminante possui deslocamento vertical na zona vadosa e, quando inserida no aquífero, esta passa a estar sujeita ao movimento das águas subterrâneas. O contaminante lixiviado refere-se, nesse caso, a excedentes químicos da adubação adicional não assimilados pela vegetação.

2.4.1. Tipos de contaminação de aquífero

Considerando a distribuição espacial, a fonte do contaminante pode ocorrer de forma pontual, difusa e/ou linear (Fetter, 1993; Feitosa *et al.*, 2008):

- Pontual: a fonte está concentrada numa pequena superfície (um poço escavado ou tubular, por exemplo);
- Difusa: a fonte abrange uma área extensa e com baixas concentrações (áreas irrigadas, por exemplo);
- Linear: a fonte de contaminação é determinada por um rio ou canal.

No presente estudo e em termos gerais, a contaminação de águas subterrâneas associadas com práticas agrícolas normalmente diz respeito ao tipo difuso.

2.4.2. Adubação química

A planta é capaz de absorver diretamente vários elementos disponíveis no meio ambiente, como carbono, hidrogênio e oxigênio, porém, tratando-se do nitrogênio (composto amplamente utilizado na adubação química), esse processo é mais lento. Apesar de amplamente disponível na atmosfera, o nitrogênio não é diretamente absorvível pela cobertura vegetal ou mesmo não atende a demanda produtiva. Nesse último caso, torna-se necessária a utilização complementar desse elemento, além de Fósforo e Potássio, dentre outros, com vistas ao aumento da produtividade. Esse processo de adubação química pode ser realizado através das folhas, mediante pulverização manual ou mecanizada e denominada de adubação foliar, via irrigação (fertirrigação) ou diretamente alocando-se o fertilizante sobre o solo.

Recomenda-se que o quantitativo desses fertilizantes utilizados na adubação seja monitorado por um engenheiro especializado (engenheiro agrônomo ou engenheiro florestal, por exemplo), para que não haja desperdícios e investimentos desnecessários. Por outro lado, ressalta-se que o uso incorreto dos fertilizantes pode acarretar perdas na produtividade, consequente do uso de proporções desbalanceadas dos nutrientes.

2.4.3. Ciclo do nitrogênio

Apesar de 78% da atmosfera ser constituída de nitrogênio, a grande maioria dos seres vivos é incapazes de utilizá-lo, pois este se encontra na forma gasosa (N_2), bastante estável, apresentando baixa capacidade de reação com outros elementos. A absorção desse elemento procede-se de forma indireta, ou seja, após transformações na sua constituição química.

A Figura 5 apresenta de forma esquemática o processo de transformação química do nitrogênio. Basicamente, o ciclo é constituído pelas seguintes etapas:

- Fixação: bactérias presentes no solo são responsáveis pela fixação do nitrogênio gasoso (N_2) presente na atmosfera; Este processo consiste na transformação do N_2 em substâncias assimiláveis pelos seres vivos, tais como amônia (NH_4);
- Decomposição: a amônia presente no solo também pode ser originada pela decomposição de restos de plantas e animais; este processo, também chamado de amonificação, é realizado por fungos e bactérias;

- Nitrificação: consiste na conversão da amônia em nitrato, passando pelo estágio intermediário, nitrito;
- Assimilação: Processo de absorção do nitrato por plantas e/ou insetos;
- Denitrificação: processo de conversão do nitrato em nitrogênio molecular por bactérias denitrificantes (*Pseudomonas denitrificans*); o nitrogênio retorna à atmosfera.

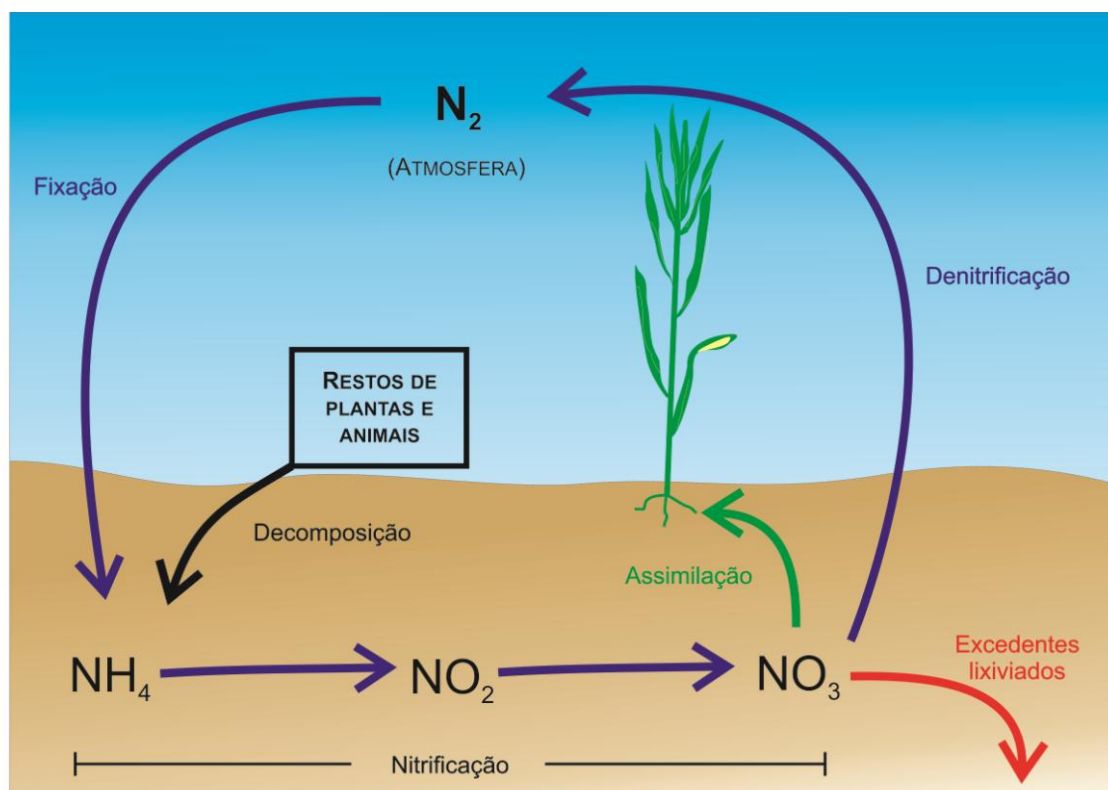


Figura 5: Ciclo do nitrogênio de forma esquemática, mostrando o processo de transformação química do nitrogênio (adaptado de Martinelli, 2007).

Quando a quantidade de nitrato excede as necessidades biológicas do meio, tem-se o seu acúmulo no subsolo, propiciando a lixiviação dessa substância pelas águas que se infiltram no subsolo (Jadoski *et al.*, 2010).

2.5. Vulnerabilidade dos sistemas aquíferos

Considerando uma discussão mais ampla e de natureza interdisciplinar, o termo “vulnerabilidade de aquíferos” pode ser entendido como a facilidade de um sistema aquífero em ser poluído. De acordo com Foster & Hirata (1987), essa facilidade é função da inacessibilidade hidráulica de penetração de contaminantes e da capacidade de atenuação dos estratos acima da zona saturada do aquífero, como resultado de sua retenção física e reações

químicas com o contaminante. Esses dois fatores interagem com os seguintes aspectos de carga contaminante no subsolo:

- i. O modo de disposição do contaminante no subsolo;
- ii. A magnitude da carga hidráulica associada;
- iii. A classe do contaminante, em termos de sua mobilidade e persistência.

Essa interação determinará, basicamente, o tempo de residência na zona não saturada e a demora na chegada do contaminante ao aquífero, bem como o grau de atenuação, retenção ou eliminação, antes de sua chegada à zona saturada.

A determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas faz uso de uma metodologia empregada na avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero e da carga poluidora proveniente das atividades antrópicas de superfície. Diante disso, tem-se a possibilidade de obter uma região caracterizada por alta vulnerabilidade, porém sem risco de contaminação devido à ausência de uma carga contaminante. Em acordo com tal explanação, Foster & Hirata (1993) afirmam em seu estudo que: *“o termo vulnerabilidade à contaminação do aquífero é usado para representar as características que determinam a susceptibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante”*.

Desse modo, os aquíferos livres são mais susceptíveis a contaminação se comparado com o tipo confinado, onde este, por definição, possui seu limite superior caracterizado por uma camada impermeável ou semi-impermeável. Por outro lado, os aquíferos livres, quando não possuem uma espessa camada de cobertura, são naturalmente mais vulneráveis à contaminação.

2.5.1. Método para avaliação dos índices de vulnerabilidade

De acordo com Vrba & Zaporozec (1994), os vários métodos de análise da vulnerabilidade de aquíferos frente à contaminação, presentes na literatura, podem ser classificados basicamente em três grupos:

1. Ambientes hidrogeológicos: a vulnerabilidade é avaliada por meio da caracterização de grandes ambientes hidrogeológicos em termos qualitativos, utilizando superposição de mapas temáticos;
2. Modelos analógicos: o índice de vulnerabilidade é definido por meio de expressões matemáticas, utilizando-se alguns parâmetros chave para análise, tais como tempo de trânsito médio na zona não saturada;

3. Sistemas paramétricos: utiliza-se parâmetros convenientes para análise da vulnerabilidade, aos quais são definidos pesos distintos, bem como interações, para gerar um índice absoluto ou relativo, tais como as metodologias DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), GOD (Foster & Hirata, 1988), dentre outras.

Pavão (2004), contudo, ao comentar algumas dessas metodologias paramétricas, ressalta que o método DRASTIC, por exemplo, tende a gerar índices de vulnerabilidade confusos devido à interação de sete parâmetros, em que alguns deles são dependentes entre si e fortemente correlacionados. Além disso, esses índices podem ser obtidos por diferentes combinações, o que poderá conduzir fatalmente a tomada de decisões inconvenientes.

A metodologia GOD, por sua vez, é capaz de avaliar a vulnerabilidade, orientando sobre o comportamento de contaminantes em subsuperfície. Sua clareza conceitual e simplicidade de aplicação, considerando dados preexistentes, favoreceram a escolha desse método no desenvolvimento do presente estudo.

2.5.2. Limitações dos mapas de vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade de aquíferos leva em consideração que o perigo de contaminação tem sua fonte de ocorrência na superfície do terreno e corpos de água. Dessa forma, a grande maioria dessas cartografias possui substanciais limitações ou mesmo não se adéquam na avaliação de riscos provenientes de descargas de contaminantes diretamente em subsuperfície, tais como vazamentos de esgotos sanitários, além de derrames de contaminantes orgânicos sintéticos imiscíveis densos (Pavão, 2004). Em ambos os casos, tem-se um perigo de contaminação extremo, independente da vulnerabilidade do aquífero.

Outras condições hidrogeológicas incluídas nas exceções de análise dos mapas de vulnerabilidades são (Pavão, 2004):

- Presença de cursos de água superficial indefinido (permanentes ou intermitentes) devido à incerteza da condição hidrológica, da qualidade do curso de água e na estimativa da capacidade de atenuação do leito ou margens;
- Superexploração do aquífero, produzindo variações acentuadas do nível de água e/ou grau de confinamento;
- Presença de aquíferos suspensos em baixas profundidades e sob condição salina relativamente elevada; nesse caso, o aquífero suspenso, por si só, possui alta vulnerabilidade, porém, caso o foco de análise seja aquíferos semi-confinados

subjacentes, uma abordagem diferenciada torna-se necessária, uma vez que o aquífero suspenso proporcionará uma proteção dessas águas.

2.6. Contribuição da geofísica na análise do grau de proteção de aquíferos

Os mapas de vulnerabilidade são caracterizados por expor as variações laterais das regiões mais e/ou menos protegidos, ou seja, mostram a sensibilidade do sistema aquífero de ser degradado qualitativamente, regido assim pelos aspectos intrínsecos do meio hidrogeológico (Lobo Ferreira & Oliveira, 2004). Tal discussão difere quando o assunto trata-se de “risco de poluição e/ou contaminação”, pois este depende da existência de uma carga contaminante penetrando na subsuperfície (Kirsch, 2009).

Neste contexto, a Geofísica vem fornecendo suas contribuições ao planejamento ambiental sustentável das águas subterrâneas, sobretudo, por meio de levantamentos geoeletricos. A exemplo disso, têm-se os mapas de condutividade elétrica, os quais possuem correlações direta com o conteúdo de argila presente no solo, componente principal para a retenção e/ou retardação de contaminantes em direção aos níveis freáticos, favorecendo também os processos de biodegradação (Kirsch, 2009).

Ainda de acordo com Kirsch (2009), a proteção de um manancial hidrogeológico encontra-se associado fundamentalmente com a existência de camadas protetoras sobrejacentes com espessuras suficientes e/ou com reduzidas condutividades hidráulicas. Essas condições proporcionariam um retardo na movimentação vertical das soluções infiltradas, além de proporcionarem maiores condições de degradação da massa do eventual contaminante através de reações bio-físico-químicas (Fetter, 1993; Feitosa *et al.*, 2008).

Na teoria dos meios condutores estratificados, conforme Braga (2008), os parâmetros de Dar Zarrouk são particularmente importantes para a interpretação e entendimento dos modelos obtidos no levantamento geofísico elétrico e respectivos modelos geoeletricos (espessuras x resistividades). Considerando um aquífero de caráter hidráulico não confinado, a sua condição de proteção natural é proporcional a espessura da zona não saturada e inversamente proporcional a condutividade hidráulica desse meio (Henriet, 1976), podendo-se tais elementos ser avaliados indiretamente pelo parâmetro geoeletrico da condutância longitudinal.

A condutância longitudinal (S), parâmetro geoeletrico de Dar Zarrouk, é caracterizada pela razão entre espessura e resistividade do meio considerado, é amplamente utilizada pela vasta literatura no tocante à avaliação da capacidade de proteção das águas subterrâneas

(Henriet, 1976; Kalinski *et al.*, 1993; Salem, 2001; Braga *et al.*, 2006; Shevinet *al.*, 2006; Braga & Francisco, 2014). Nesse contexto, a condutividade hidráulica e/ou o conteúdo de argila nos sedimentos podem ser avaliados por sua resistividade elétrica, assumindo que as menores resistividades estão ligadas a maiores concentrações de argilominerais e/ou menores condutividades hidráulicas, o que interfere no tempo de percolação das soluções penetrantes no meio (Henriet, 1976; Kalinski *et al.*, 1993; Braga & Francisco, 2014).

CAPÍTULO 3 – CONTEXTO GEOLÓGICO

A contextualização geológica da área em estudo e os aspectos tectônicos regionais foram fundamentados em bibliografias disponíveis e adaptação do mapa geológico regional elaborado por Angelim *et al.*, (2006).

3.1. Litoestratigrafia regional

A estratigrafia regional é composta por duas sequências básicas, sendo uma não aflorante e outra aflorante (Nogueira, 1982; Bezerra, 1998; Lucena, 2005; Angelim *et al.*, 2006), conforme apresentado na Figura 6:

- Sequência não aflorante: envolve o embasamento cristalino Pré-Cambriano e rochas sedimentares da bacia mesozóica (considerando informações de perfis de poços da região);
- Sequência aflorante: abrange rochas sedimentares cenozóicas da Formação Barreiras, esta de idade terciária-quadernária, e as coberturas quadernárias.

3.1.1. Sequência não aflorante

O embasamento cristalino é representado por granitos, granodioritos, migmatitos e gnaisses correlacionados ao Complexo Caicó (Bezerra *et al.*, 1998; Lucena, 2005). Já os sedimentos mesozóicos são constituídos por uma unidade arenítica (basal) e outra carbonática (topo), embora esta última com intercalações areníticas (Lucena, 2005). Esta sequência, também mencionada como infra-Barreiras (IPT, 1982), vem sendo correlacionada aos depósitos das formações Beberibe (base) e Gramame-Maria Farinha (topo). Estas são compostas, respectivamente, por arenitos diversos e rochas carbonáticas, inseridos estratigraficamente na bacia sedimentar costeira Pernambuco-Paraíba (Rossetti *et al.*, 2011).

3.1.2. Sequência aflorante

Na sequência aflorante, a Formação Barreiras é constituída por um conjunto de litologias siliciclásticas cenozóicas, envolvendo desde argilitos a conglomerados, embora com predominância de arenitos argilosos, os quais se acham sobrepostos discordantemente a rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino ou rochas sedimentares mesozóicas (Nogueira, 1982; Lucena, 2005). Dados de perfis de poços locais demonstram que a

Formação Barreiras repousa discordantemente sobre as unidades mesozóicas da região, ocupando a base da coluna estratigráfica aflorante.

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO	Sedimentos de praia; sedimentos de mangue; coberturas arenosas; aluviões e dunas móveis.
		PLEISTOCENO	<i>Beachrocks</i> e dunas fixas.
	TERCIÁRIO	PLIOCENO	Formação Barreiras
		MIOCENO	
MESOZOICO	CRETÁCEO	.	Sequência arenítica/carbonática
PROTEROZOÍCO/ ARQUEANO	.	.	Embasamento cristalino

Figura 6: Unidades estratigráficas para a área da bacia do Rio Catu-RN (adaptado de Lucena, 2005).

Capeando a Formação Barreiras, tem-se toda a sedimentação quaternária, a qual se pode diferenciar uma sedimentação sub-recente (*beachrocks* e dunas fixas) e recente (coberturas arenosas, aluviões, dunas móveis, além dos sedimentos de mangues e de praias atuais, ambas representando a faixa litorânea do Estado). Essa terminologia, de natureza empírica, é utilizada para diferenciar as unidades litoestratigráficas do Quaternário, que estão sujeitas ou não aos processos de sedimentação atuais (Lucena, 2005).

No tocante às unidades aflorantes sub-recentes, os *beachrocks* possuem litologia arenítica de cor escura e granulometria variada, contendo diversos fragmentos de conchas e/ou da Formação Barreiras. Estão presentes em vários pontos da linha de costa na forma de

estreitas faixas paralelas e alinhados segundo a direção norte-sul, a exemplo que ocorre na desembocadura do Rio Catu (Lucena, 2005). As dunas fixas são resultados da ação eólica e dispostas diretamente sobre a Formação Barreiras, ocupando o extremo nordeste da área e partes do sudeste desta. Sua litologia é composta por areias quartzosas bem selecionadas (típica de ambientes eólicos), de coloração amarelo-avermelhada à cinza ou branco (Lucena, 2005), encontrando-se fixadas pela vegetação.

Em termos de unidades estratigráficas aflorantes recentes, as coberturas arenosas, também denominadas de depósitos de paleo-cascalheiras (Angelim *et al.*, 2006), compreendem areias quartzosas moderadamente selecionadas e de granulometria média, com coloração branco-acinzentada. Estas se encontram acumuladas em depressões localizadas e seguem a Formação Barreiras em termos de área de ocorrência na bacia do Rio Catu (figura 7). As aluviões são caracterizadas pelos terraços dos principais drenos da área, possuindo geralmente um selecionamento pobre de grãos, com partículas desde siltica a matacões e com predominância quartzosa. Os sedimentos de mangue compreendem um substrato lamoso de cor escura e vegetação característica, preenchendo reentrâncias marinhas litorâneas, com suas maiores ocorrências a norte e sul da área de estudo (desembocadura dos rios Jacú e Curimataú, além de uma pequena exposição na foz do Rio Catu, na localidade de Cibaúma). As dunas móveis são representadas por areias quartzosas de granulometria média e de bom selecionamento, dispostas segundo a direção dos ventos regionais predominantes (SE). Ocorrem em todo o litoral do Estado na forma de cordões arenosos. Os sedimentos de praia acham-se limitados à própria linha de costa, com constituição litológica similar aos depósitos eólicos móveis, além de conterem fragmentos de conchas calcáreas.

3.2. Contexto tectônico

A contextualização tectono-estrutural do litoral leste potiguar, particularmente aquele que envolve as unidades cenozóicas locais, mostra-se com assinaturas mais proeminentes segundo duas direções principais, NE e NW (Lucena, 2005; Nogueira *et al.*, 2006; Bezerra *et al.*, 1998; Rossetti *et al.*, 2011; Lucena *et al.*, 2013b; Bezerra *et al.*, 2014). Tais estruturas delimitam *grabens* e *horsts*, caracterizando os principais vales da região, assim como a disposição de algumas unidades estratigráficas quartenárias com direções preferenciais.

O condicionamento estrutural regional recente é avaliado por esses autores reportados como resultado principal do empurrão da cadeia Meso-Atlântica, configurando um campo de tensões com uma compressão e distensão máximas em E-W e N-S, respectivamente.

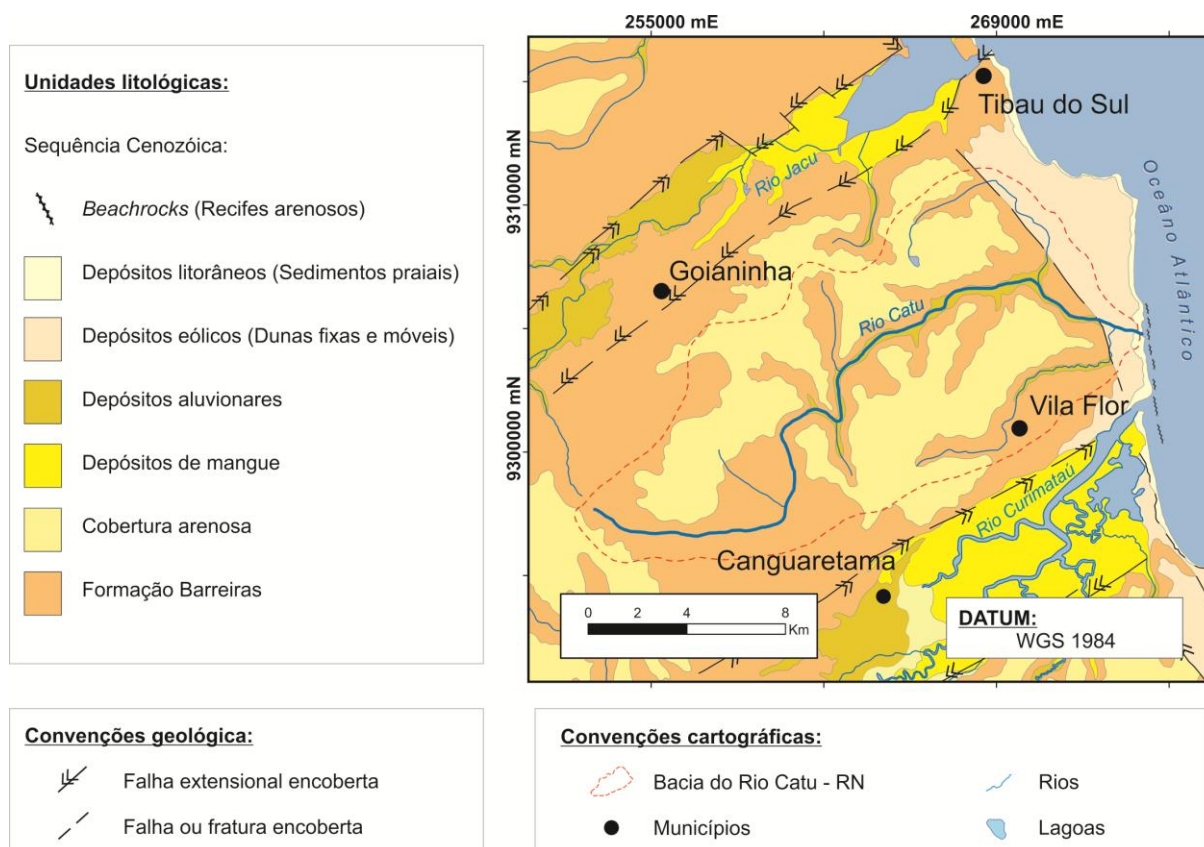


Figura 7: Esboço geológico da área da bacia hidrográfica do Rio Catu–RN e adjacências (adaptado de Angelim *et al.*, 2006).

CAPÍTULO 4 – CONTEXTO HIDROLÓGICO

O conhecimento do contexto hidrológico é proveniente de informações disponibilizadas pelo IPT (1982) e informações de poços disponíveis pela CAERN (Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte), FUNASA (Fundação Nacional de Saúde), EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte), CDM - RN (Companhia de Desenvolvimento dos Recursos Minerais do Rio Grande do Norte), da SEMARH - RN (Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte), além de empresas privadas de reconhecida capacidade técnica na execução de poços.

O contexto hidrológico local é representado pelo Aquífero Barreiras (referente à hidrologia subterrânea local) e a bacia hidrográfica do Rio Catu (compondo à hidrologia superficial).

4.1 Aquífero Barreiras

De acordo com os relatórios desenvolvidos pelo IPT (1982) e informações de poços disponíveis pelos órgãos públicos supracitados e empresas privadas afins, o Aquífero Barreiras possui predominantemente um caráter hidráulico característico de aquífero livre, o que torna as águas subterrâneas particularmente mais susceptíveis a contaminações, sobretudo em locais onde as espessuras não saturadas são reduzidas. De acordo com Rodrigues *et al.* (2011), este manancial possui variações de espessura da ordem de 20 m a 90 m.

O Aquífero Barreiras, homônimo da unidade estratigráfica, possui como limite inferior na área de estudo o embasamento cristalino (ocorrência mais frequentes nas áreas mais próximas de contato deste com a bacia sedimentar costeira leste do RN), ou mesmo o topo da sequência carbonática mesozóica não aflorante, a qual foi identificada nas perfurações como sendo constituída por rochas sedimentares areno-argilosas e argilosas de composição calcífera e de baixa potencialidade hidrogeológica (Lucena, 2005; Silva *et al.*, 2014).

Conforme o estudo desenvolvido por Melo *et al.* (1994) e Melo (1995), uma importante fonte de recarga do Aquífero Barreiras são as formações dunares, devido a sua elevada porosidade e baixo índice de escoamento superficial favorecendo a recepção das precipitações pluviométricas. Dessa forma, o aquífero foi denominado por Dunas-Barreiras, sobretudo nas regiões de ocorrência desses depósitos eólicos sobrepostos, integralizando um sistema hidráulico único e indiferenciado. Essa terminologia, contudo, foi simplificada à

Aquífero Barreiras, tendo em vista a ocorrência de dunas apenas no extremo nordeste e leste da área de estudo.

Trabalhos anteriores, com destaque para os de Lucena (2005) e Lucena *et al.* (2013b), mostram o contexto estrutural regional como preponderante na configuração da geometria do Aquífero Barreiras em outras áreas do litoral leste do RN. De acordo com Souza *et al.* (2013), os rejeitos das falhas na área da bacia do Rio Catu, quantificados com base em variações do topo da sequência carbonática não aflorante (embasamento do Aquífero Barreiras), variam de 10m a 50m. A associação de estruturas frágeis e espessuras saturadas, ainda de acordo com esses autores, reflete-se nas potencialidades hidrogeológicas regionais, incluindo zonas de maiores ou menores transmissividades hidráulicas relativas (em relação a subáreas adjacentes).

No tocante à condição hidrodinâmica, o Aquífero Barreiras comporta-se de maneira bastante variável, sobretudo no litoral sul do RN. Este comportamento pode apresentar-se de livre a semiconfinado, sendo a camada semiconfinante no topo é representada por lentes argilas da própria Formação Barreiras, por vezes de considerável extensão superficial (IPT, 1982). Particularmente na área da bacia do Rio Catu, esta condição hidráulica, variando de livre a semi-confinado, foi igualmente evidenciada, seja pelos aspectos gerais da potencimetry local, seja pelos resultados de testes de aquífero executados. Estes últimos revelaram valores da ordem de $2,63 \times 10^{-3}$ a $3,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ de transmissividade hidráulica (T) e de $5,98 \times 10^{-5}$ a $7,58 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ de condutividade hidráulica (K), considerando-se uma espessura saturada média de 40m.

4.1.1 Potencimetry da área

O mapa potencimétrico de uma área oferece alguns recursos significativos para a análise hidrogeológica do local. Sobretudo ele indica, em termos qualitativos, a direção do fluxo hidráulico e se a drenagem superficial principal comporta-se como efluente ou influente em relação ao aquífero. Além disso, no tocante a análise quantitativa, é possível avaliar gradientes hidráulicos ou mesmo identificar subáreas com maiores potencialidades hidrogeológicas em termos de transmissividade hidráulica (Feitosa *et al.*, 2008). Nesse contexto, cargas hidráulicas de 43 poços locais (Tabela 1) possibilitaram a elaboração de uma cartografia da potencimetry do Aquífero Barreiras para toda a área (Figura 8).

Tabela 1: Poços utilizados para a determinação da potencimetria do Aquífero Barreiras na área da bacia hidrográfica do Rio Catu – RN.

Poço utilizado (dados)	UTM X (m)	UTM Y (m)	Carga hidráulica (m)
1	255795	9296831	56,6
2	255837	9296972	51,7
3	257013	9296740	51,4
4	257577	9296824	49,9
5	257798	9296587	47,2
6	259215	9296455	45,7
7	260836	9297039	40,1
8	261190	9298079	35,5
9	261807	9297201	39,8
10	262232	9297532	39,4
11	261217	9296344	40,8
12	261718	9296217	38,3
13	262231	9295627	33,5
14	261831	9295334	33,9
15	263911	9295327	12,0
16	264054	9297595	38,6
17	264945	9298159	37,4
18	265521	9298163	34,2
19	262846	9301085	21,1
20	265359	9302801	30,6
21	256891	9303229	57,1
22	260398	9305330	41,5
23	262050	9306081	31,1
24	263363	9305085	22,1
25	263839	9304160	9,1
26	269961	9301462	13,3
27	270195	9301213	11,8
28	270678	9301372	10,1
29	270496	9302951	5,2
30	273415	9304150	2,6
31	271932	9305289	4,0
32	272455	9305242	3,5
33	273472	9304776	2,3
34	274061	9304766	2,1
35	270309	9306674	3,8
36	271401	9307182	3,4
37	272701	9307326	4,7
38	274568	9305623	2,3
39	267941	9310287	20,5
40	270418	9310312	11,8
41	264432	9306849	27,8
42	269107	9299501	15,6
43	274683	9304648	2,0

A análise desse mapa evidencia um fluxo principal de oeste para leste, em direção à linha de costa, além de outros secundários e convergentes no sentido do Rio Catu, caracterizando uma descarga natural do aquífero e a ampla interação com a drenagem

superficial. Os gradientes hidráulicos máximo e mínimo são observados na região central e nordeste da área da bacia do Rio Catu, com os valores de $16,6 \cdot 10^{-3}$ e $0,83 \cdot 10^{-3}$, respectivamente.

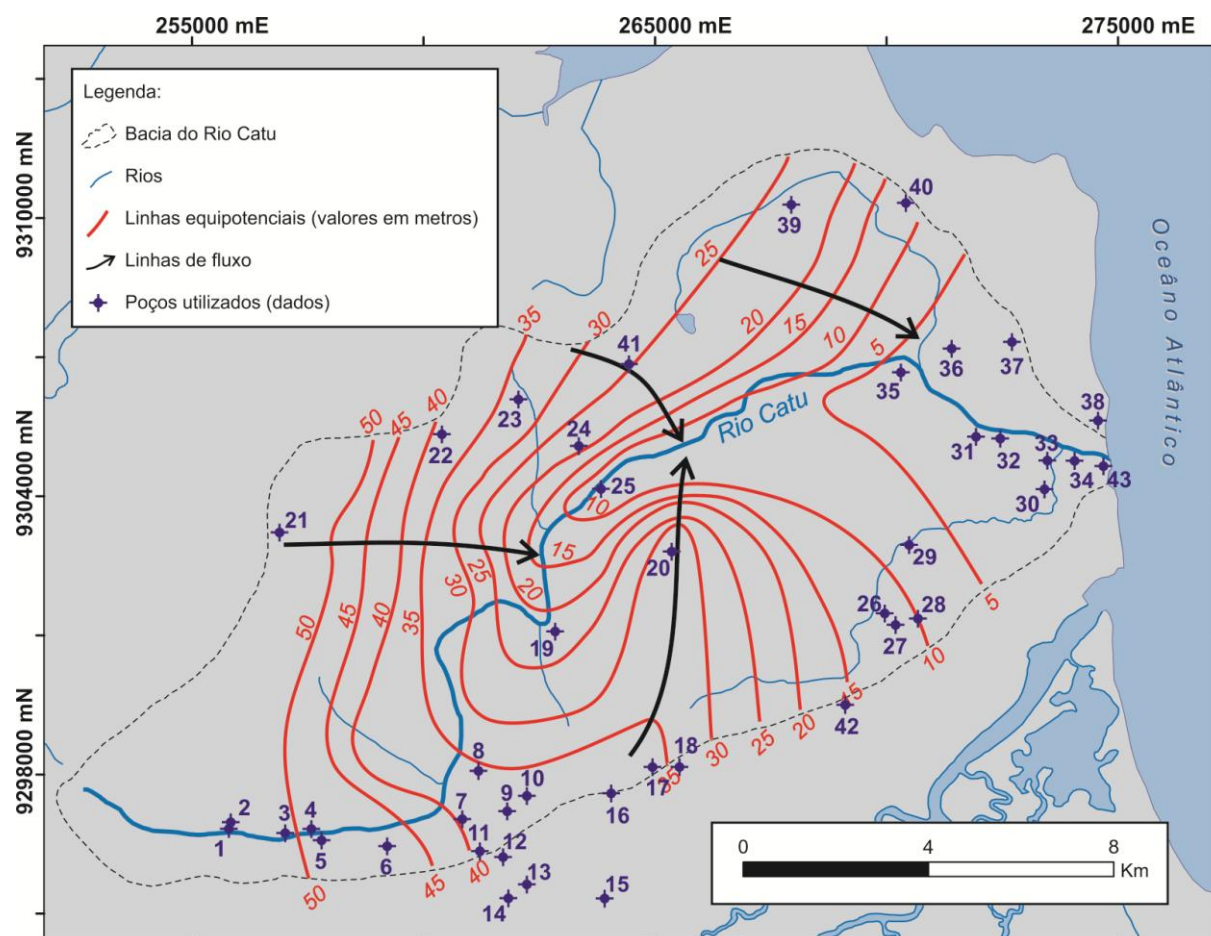


Figura 8: Mapa potenciométrico do Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Catu-RN.

4.1.2 Aspectos físico-químicos

Análises físico-químicas das águas subterrâneas no contexto do Aquífero Barreiras na área bacia hidrográfica do Rio Catu-RN foram executadas por Lucena *et al.* (2013a), com ênfase na classificação das águas subterrâneas e para o diagnóstico da ocorrência de compostos nitrogenados (nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato). Esses autores efetuaram amostragens em 40 poços, sob regime de baixa vazão (*low flow*), sendo 30 poços tubulares, 4 piezômetros e 6 poços amazonas.

No estudo reportado, as águas foram classificadas com base nos íons dominantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$, HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} e Cl^{-}), expressos em unidade meq/L (Feitosa *et al.*, 2008), caracterizando os tipos cloretadas sódicas (30 amostras), cloretadas mistas (5 amostras) e bicarbonatadas mistas (5 amostras). No tocante a análise dos compostos

nitrogenados, foram evidenciadas 11 amostras com teores de nitrogênio amoniacal, variando de 0,01 a 2,86 mg/L, 3 amostras com teores de nitrito, variando de 0,03 a 0,63 mg/L, e 37 amostras apresentando teores de nitrato, variando de 0,05 a 6,67 mg/L. A distribuição dos teores de nitratos identificados ao longo da bacia é mostrado na Figura 9.

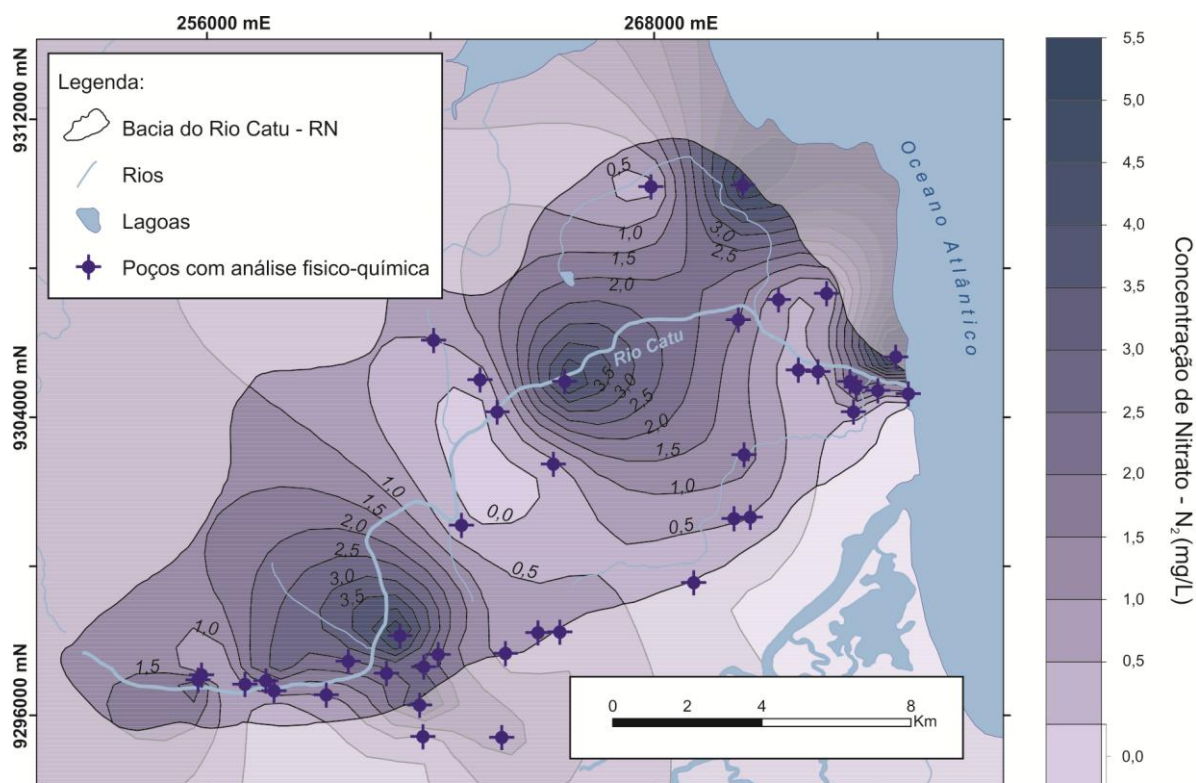


Figura 9: Mapa de isoconcentrações de nitrato (NO_3^-), área da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN (adaptado de Lucena *et al.*, 2013a).

De acordo com Lucena *et al.* (2013a), as anomalias, no extremo nordeste do referido mapa, podem ser creditadas à deficiência da rede de esgotamento sanitário, visto que é uma área com adensamento populacional. Por outro lado, as demais anomalias (centro-nordeste e centro-sudoeste do mapa) ocorrem em regiões praticamente não habitáveis, embora sob intensivo cultivo da cana-de-açúcar.

A cartografia de concentração de nitrato será utilizada no presente estudo de forma a subsidiar e contemplar uma análise local integrada do grau de proteção natural do Aquífero Barreiras, assinalando aspectos sobre o tempo relativo da ocorrência das anomalias evidenciadas, bem como a própria eficácia dos métodos propostos.

4.2 Bacia hidrográfica do Rio Catu – RN

Localizada no litoral leste do Rio Grande do Norte, a bacia do Rio Catu abrange uma área de aproximadamente 200 Km^2 , conforme reportado. Essa bacia é caracterizada

geomorfologicamente pela presença de Faixa Litorânea e Tabuleiros Costeiros, representados por relevos de dunas fixas e relevos tabulares, respectivamente.

O relevo predominantemente plano a suavemente ondulado interagindo com as elevadas taxas de pluviometria, que ocorrem na região, favorecem a infiltração e armazenamento d'água nas formações rochosas. Consequentemente, tem-se a presença de importantes reservas hídricas subterrâneas, rios perenes, além de pequenas lagoas nos tabuleiros costeiros ou em vales interdunares. O padrão geral da drenagem é o detrítico e seus principais tributários são: Rio Catu e os riachos Carrapato, Galhardo, Catuzinho e Gramació. Ressalta-se que o regime hídrico perene dos principais drenos superficiais deve-se à descarga natural do Aquífero Barreiras, conforme discutido nos tópicos precedentes, o que caracteriza o referido rio como efluente em relação ao Aquífero Barreiras. De acordo com SERHID (1998), o Rio Catu possui vazões médias da ordem de $3,01 \text{ m}^3/\text{s}$.

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA EMPREGADA

Para o desenvolvimento do presente estudo, utilizaram-se métodos geofísicos elétricos para análise do grau de proteção do Aquífero Barreiras na área da bacia hidrográfica do Rio Catu, sobretudo modelos inversos de sondagens elétricas verticais (SEV's) e valores de condutância longitudinal (Orellana, 1972). Somado a isso, tais dados foram confrontados e avaliados em conjunto com a aplicação da metodologia GOD proposta por Foster & Hirata (1998) para a análise de vulnerabilidade do aquífero local. A aplicação conjunta desses métodos inclui ainda a utilização de informações de poços provenientes de um banco de dados hidrogeofísico da área.

5.1. Método da eletrorresistividade

Para a caracterização geométrica do contexto que envolve o Aquífero Barreiras e a zona não saturada adjacente, na área da bacia do Rio Catu, utilizou-se a metodologia geofísica da eletrorresistividade, de caráter exploratório e quantitativo. Os métodos geoeletricos, em sua essência, estão fundamentados na determinação da resistividade elétrica dos materiais que, juntamente com a constante dielétrica e permeabilidade magnética, expressam basicamente as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas (Orellana, 1972; Koefoed, 1979). A resistividade elétrica dos materiais (solos e rochas) fornece, de forma indireta, as características petrofísicas do meio (porosidade, grau de alteração, fraturamento, saturação, litotipos, dentre outros aspectos) tendo como fundamentação teórica a Lei de Ohm. Esta última expressa que a densidade de corrente (J), em qualquer ponto de um condutor homogêneo e isotrópico, é proporcional à derivada do potencial em relação à distância (dV/dL), sendo o fator de proporcionalidade representado pela condutividade elétrica (σ), conforme observado na Equação 1:

$$J = -\sigma \frac{dV}{dL} \quad (1)$$

A resistividade, por sua vez, é uma medida da dificuldade que um determinado material impõe à passagem de uma corrente elétrica, correspondendo ao inverso da condutividade. A resistividade (ρ) é dada em $\text{ohm}\cdot\text{m}$ (ou $\Omega\cdot\text{m}$), a condutividade (σ) é dada em Siemens/m (ou S/m), uma vez que esses dois parâmetros possuem relação inversa, conforme Equação 2:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Em termos práticos, considerando a metodologia geofísica da eletrorresistividade, enquanto a diferença de potencial é obtida entre dois pontos, a corrente elétrica exige um fechamento do circuito. Deste modo, adota-se o sistema em quadripolo como dispositivo prático de medição de resistividade (Orellana, 1972).

Dessa forma, introduzindo-se uma corrente elétrica (I) no subsolo através de dois eletrodos (AB), uma diferença de potencial (ΔV) é produzida, que por sua vez é medida por um segundo par de eletrodos (MN). O valor medido da diferença de potencial é função da resistividade aparente do subsolo e do arranjo geométrico dos eletrodos (K), sendo as profundidades investigadas diretamente proporcionais ao espaçamento entre os eletrodos (Orellana, 1972). De forma geral, pode-se calcular o valor da resistividade (ρ) do meio investigado mediante a seguinte equação:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

Portanto, o uso da eletrorresistividade no campo, é baseado na capacidade do equipamento introduzir uma corrente elétrica no subsolo a diferentes profundidades de investigação, e calcular as resistividades dos materiais geológicos a essas várias profundidades. Em termos qualitativos, o levantamento da eletrorresistividade pode ser realizado utilizando-se três técnicas: Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Caminhamento Elétrico (CE) e Perfilagem Elétrica (PERF). Essas são diferenciadas a partir dos procedimentos de campo no sentido de se obter o parâmetro físico a ser estudado (variações de resistividade das rochas), ou seja, na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou interior de furos de sondagens. As SEV e CE são efetuadas a partir da superfície do terreno obtendo variações verticais e horizontais de resistividades, respectivamente. Já a PERF é efetuada no interior de furos de sondagens.

Visto que o presente estudo requer a caracterização dos horizontes hidroestratigráficos, sobretudo a identificação do nível não saturado sobreposto ao aquífero, adotou-se a técnica da sondagem elétrica vertical.

5.1.1. Técnica da sondagem elétrica vertical

A técnica geolétrica da sondagem elétrica vertical (SEV) consiste, basicamente, em injetar corrente elétrica no meio através dos eletrodos de corrente (A e B) e medir a diferença de potencial entre os eletrodos de potencial (M e N), conforme esquematizado na Figura 10.

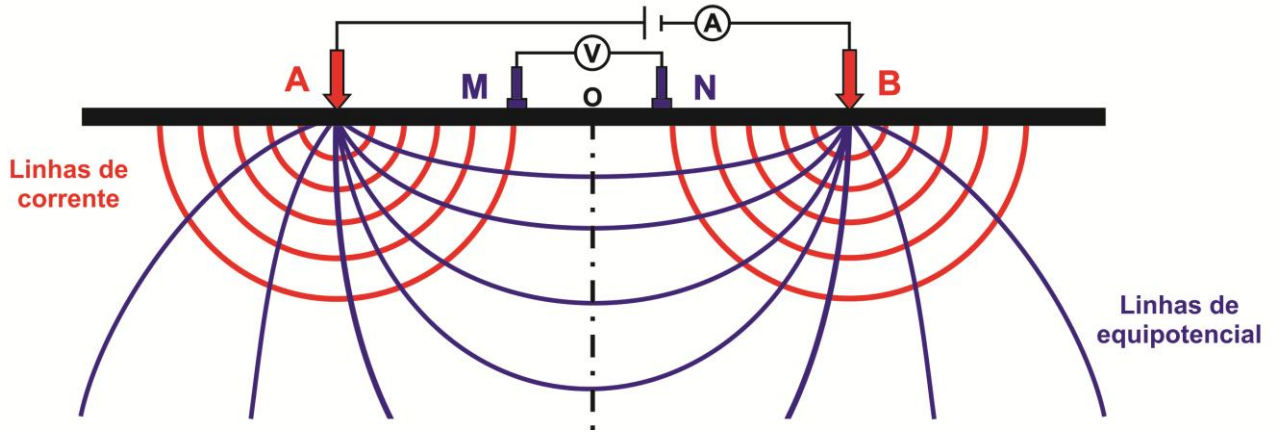


Figura 10: Esquema de aquisição da sondagem elétrica vertical com os eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N), adaptado de Reynolds (1997).

Sendo o arranjo de eletrodos do tipo "Schlumberger", os eletrodos de potencial ficam posicionados entre os eletrodos de corrente de tal forma que o espaçamento MN deve ser no máximo um quinto do espaçamento AB (Equação 4), ou seja:

$$\overline{MN} \leq \frac{\overline{AB}}{5} \quad (1)$$

Com o conhecimento dos valores de corrente injetada no subsolo, diferença de potencial e o fator geométrico (função do tipo de arranjo adotado), a resistividade aparente do meio e o fator geométrico para o arranjo Schlumberger são determinados pelas equações 5 e 6 (Orellana, 1972; Reynolds, 1997):

$$\rho_a = k_{Schl} \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

$$k_{Schl} = \frac{\pi \left(\frac{\overline{AB}}{2} \right)^2}{\overline{MN}} \left[1 - \frac{\overline{MN}^2}{4 \left(\frac{\overline{AB}}{2} \right)^2} \right] \quad (3)$$

Sendo:

ρ_a = resistividade aparente;

ΔV = diferença de potencial;

I = corrente elétrica;

k_{Schl} = Fator geométrico para o arranjo Schlumberger;

\overline{AB} = distância entre os eletrodos A e B;

\overline{MN} = distância entre os eletrodos M e N.

O modelo geoeletrico adotado e compatível com a realidade geológica da área possui as seguintes características:

- i. O subsolo é constituído por uma sequência de camadas com espessuras (E_i) finitas, excetuando-se a última que é dada como infinita;
- ii. Cada camada é admitida como sendo eletricamente homogênea e isotrópica, sendo caracterizada por uma resistividade (ρ_i);
- iii. As interfaces de separação entre as camadas são planas e horizontais e paralelas à superfície do terreno.

Foram realizadas 16 sondagens geoeletricas na área em estudo e adjacências, obtendo-se como resultado curvas de resistividade em gráfico bi-logaritmo de “ $\rho_a \times AB/2$ ” para cada ponto central das SEV's, o que possibilitou a posterior definição de modelos interpretativos inversos locais de resistividades versus espessuras.

5.1.2. Calibração geoeletrica

O processo de calibração geoeletrica, esta destinada a análise quantitativa da estratigrafia geoeletrica em subsuperfície, consiste em executar uma SEV contígua a um poço de perfil litológico conhecido. No presente trabalho, utilizaram-se as configurações de respostas elétricas obtidas por Lucena (2005) a respeito da calibração executada em Parnamirim-RN (UTMX de 250072m e UTM Y de 9344710m), localizada ao norte da área em estudo (Figura 11). Esta calibração, embora fora da área geográfica de estudo, encontra-se rigorosamente dentro do mesmo contexto hidrogeológico (Aquífero Barreiras).

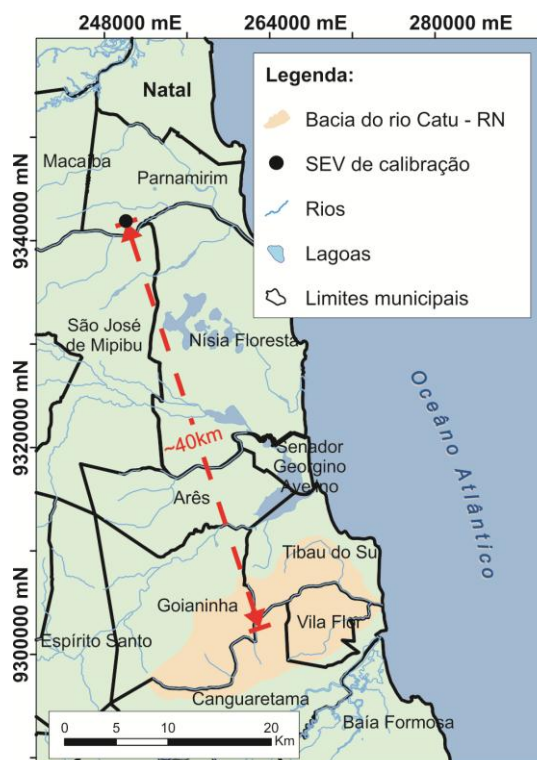


Figura 11: Localização da sondagem elétrica de calibração no loteamento de Sonho Verde, em Paranmirim – RN, executada por Lucena (2005).

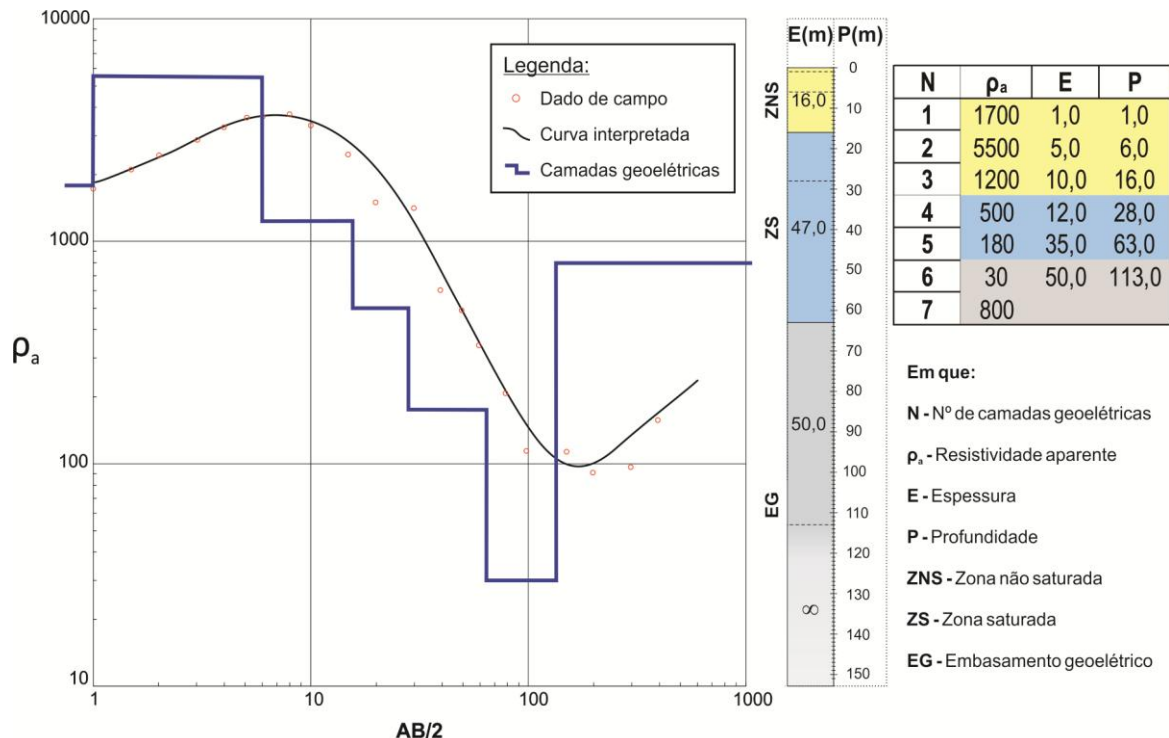


Figura 12: Curva de resistividade aparente referente à SEV utilizada para a calibração geoeletrica e respectivo modelo geoeletrico inverso interpretado (adaptado de Lucena, 2005).

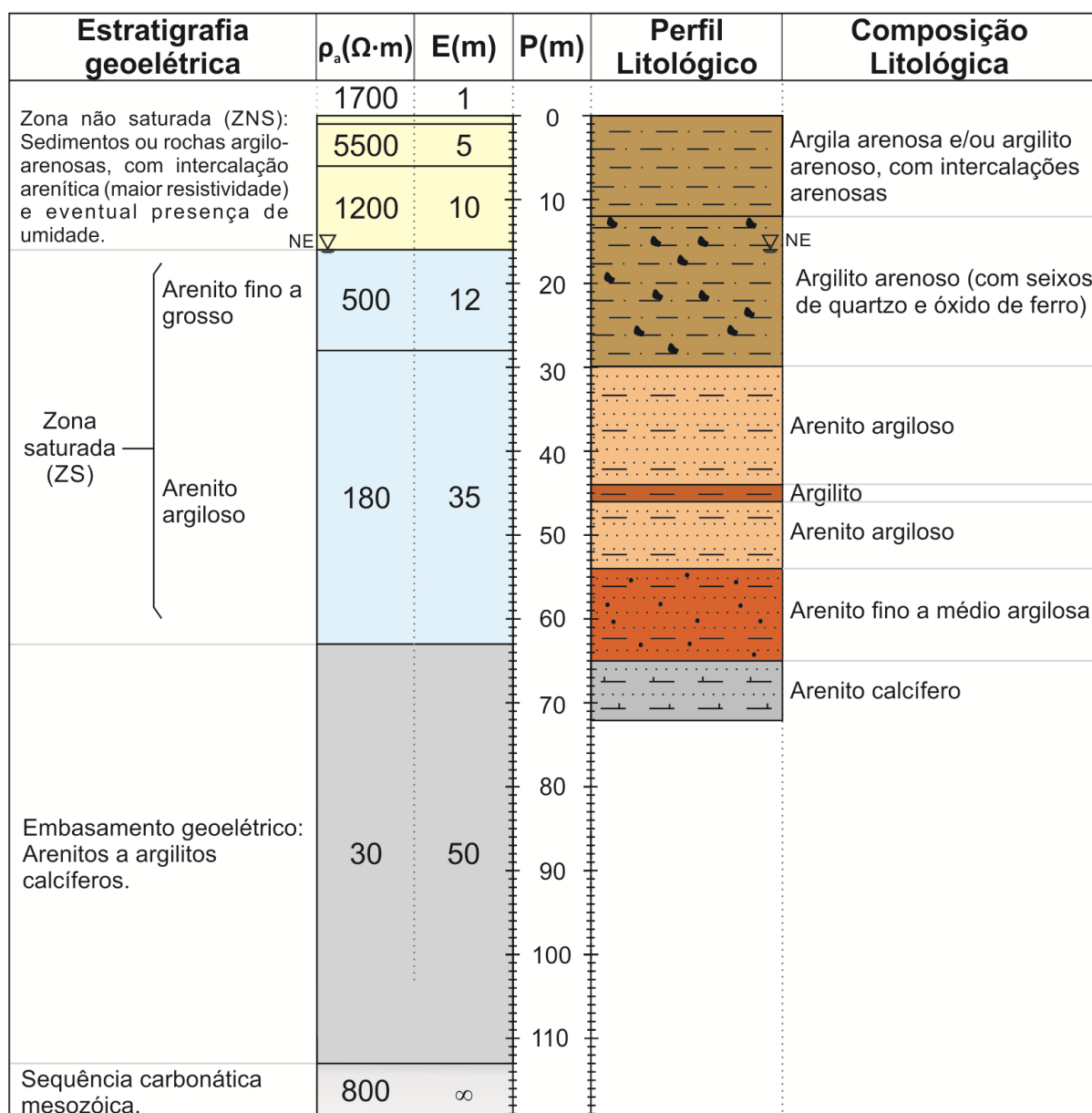


Figura 13: Perfil litológico de poço e hidroestratigrafia geoeletrica de calibração; o nível estático (NE) encontra-se a 16,0m de profundidade; adaptado de Lucena (2005).

A curva de resistividade obtida e interpretada por Lucena (2005), exposta na Figura 12, fornece um modelo geoeletrico compatível com o perfil litológico de poço disponível (Figura 13). A obtenção deste modelo calibrado consiste em se fixar os valores de espessuras, de acordo com as informações apresentadas na descrição do perfil hidroestratigráfico do poço, buscando-se o melhor ajuste possível de uma curva teórica, calculada a partir de um modelo geoeletrico.

Com base nos dados da calibração geoeletrica e observações de litotipos aflorantes na bacia, foram determinados os intervalos de resistividade aparente associados com a respectiva

composição litológica encontrada para a zona não saturada sobreposta ao aquífero (tabela 2), o qual representa o principal horizonte de interesse no presente estudo.

Tabela 2: Associação dos intervalos de resistividade aparente com as características litológicas, para o contexto que envolve a zona não saturada sobreposta ao Aquífero Barreiras.

Resistividade aparente (ρ), em $\Omega \cdot m$	Característica do meio litológico associado
$\rho < 1000$	Sedimentos e/ou rochas sedimentares de composição predominantemente argilosa;
$1000 < \rho < 2500$	Sedimentos e/ou rochas sedimentares de composição areno-argilosa a arenosa, respectivamente associados com valores menores e maiores de resistividade no intervalo considerado;
$\rho > 2500$	Sedimentos e/ou rochas sedimentares de composição arenítica grosseira a conglomerática.

5.1.3. Equipamento e softwares utilizados

O equipamento utilizado na aquisição dos dados foi um resistivímetro tipo GeoTest RD-300B, do fabricante GeoTest Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos Ltda (Figura 14).

A técnica da “embreagem” (Orellana, 1972) foi utilizada durante a aquisição das SEVs. Conforme descrito por Orellana (1972), esse procedimento é utilizado diante da necessidade de aumentar a precisão nas leituras de diferença de potencial. Esta técnica consiste, basicamente, na realização de leituras com o mesmo espaçamento de eletrodos de corrente (AB), utilizando-se diferentes aberturas dos eletrodos de potencial (MN).

As curvas de resistividade foram interpretadas utilizando o software IPI2Win, versão 2.1 (Bobachev *et al.*, 2000), na qual modelos de “resistividades elétricas x espessura” são obtidos a partir de inversão dos dados de campo. O modelo geoeletrico possibilita a identificação da hidroestratigrafia local, além dos valores pontuais de espessuras saturadas e não saturadas.



Figura 14: Resistivímetro tipo GeoTest RD-300B.

5.1.4. Parâmetro e função de Dar Zarrouk condutância longitudinal "S"

Nos meios condutores estratificados, alguns parâmetros possuem fundamental importância na interpretação e entendimento do modelo geoeétrico para uma determinada situação geológica em profundidade (Orellana, 1972). Nesse contexto, o presente estudo utilizou o parâmetro geoeétrico de Dar Zarrouk condutância longitudinal (Maillet, *in* Orellana, 1972), em face de sua aplicabilidade à estudos hidrogeológicos (Henriet, 1976; Kirsch 2009).

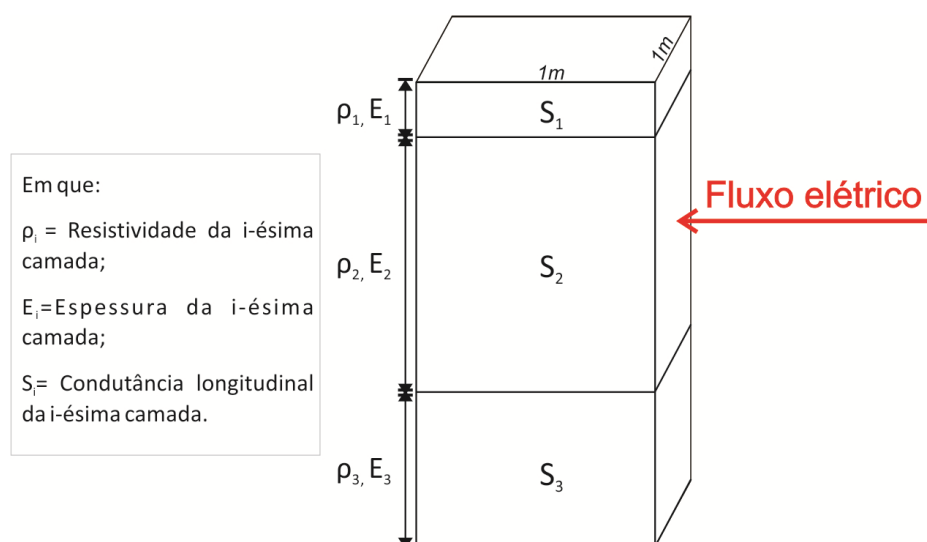


Figura 15: Esquema de propagação da corrente elétrica no subsolo para um aquífero multicamadas. O fluxo elétrico paralelo a estratificação é atribuído ao cálculo da condutância longitudinal (adaptado de Orellana, 1972).

Para um meio estratificado (caso encontrado na área em estudo por tratar-se de uma região composta por deposições de sequências sedimentares), toma-se como modelo um

prisma reto de secção transversal quadrada, com eixo perpendicular à orientação de suas camadas e cujos lados tenham comprimentos unitários (Figura 15).

De acordo com Orellana (1972), o fluxo de uma corrente elétrica a partir do subsolo pode tomar dois caminhos preferenciais: um perpendicular e o outro paralelo à estratificação. Considerando o fluxo de corrente paralelo à estratificação, a resistência R_i (associada às camadas do prisma de espessuras E_i , resistividades ρ_i , comprimento L e secção transversal S) será:

$$R_i = \frac{\rho_i L}{S} = \frac{\rho_i}{E_i \cdot 1} = \frac{\rho_i}{E_i} \quad (7)$$

Usando-se o parâmetro inverso da resistência (a condutância), uma vez que essa possui propriedade aditiva, a condutância S_i , será dado por:

$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \quad (8)$$

Para o conjunto das n primeiras camadas da secção, tem-se então:

$$S_i = \sum_i \frac{E_i}{\rho_i} \quad (9)$$

A condutância longitudinal (S) ressalta, dessa forma, uma relação de espessura e resistividade das camadas em subsuperfície. No caso específico de zonas aquíferas, valores relativos elevados de "S" para horizontes sobrepostos evidenciarão uma zona saturada mais protegida frente a eventuais cargas contaminantes em fluxo vertical. Essa observação deve-se ao fato de que se teria, dessa forma, uma espessura da camada sobrejacente elevada ou uma diminuição do valor de resistividade elétrica dessa mesma cada, associada a rochas sedimentares de composição mais argilosa (rochas de menor condutividade hidráulica). Esse cenário, no presente estudo, foi aplicado para a zona não saturada, já que o Aquífero Barreiras possui caráter hidráulico local predominantemente livre.

De acordo com Braga & Francisco (2014), a aplicação do parâmetro geoeletrico de Dar Zarrouk pode contribuir de maneira significativa com os estudos de manejo ambiental de determinada área de ocorrência de um aquífero. Através deste, pode-se ter uma avaliação do risco de determinado sistema hidrogeológico ser alcançado por alguma carga contaminante imposta na superfície do terreno, através da determinação da espessura e resistividade das camadas que compõem essa zona não saturada. Esta última, adjacente ao aquífero, é

responsável pela proteção física do manancial frente a possíveis cargas contaminantes, considerando um deslocamento vertical desta em subsuperfície.

5.2. Metodologia G.O.D para análise de vulnerabilidade de aquíferos

Proposta desenvolvida por Foster & Hirata (1998), a metodologia G.O.D permite a análise da susceptibilidade de um aquífero à contaminação mediante a interação dos seguintes parâmetros:

- *Groundwater hydraulic confinement*: grau de confinamento hidráulico, ou seja, condição do aquífero;
- *Overlaying strata*: ocorrência de substrato litológico;
- *Depth to groundwater table*: profundidade do lençol freático, ou seja, corresponde à espessura não saturada sobreposta ao aquífero.

A estimativa do índice de vulnerabilidade envolve três etapas:

1. Identificação do grau de confinamento hidráulico do aquífero Barreiras na área e atribuir o valor correspondente de 0,0 a 1,0;
2. Conhecimento das características litológicas, nas quais serão fornecidas, neste caso em estudo, por dados de poços e/ou dados de sondagens geoeletricas. Vale salientar que o peso atribuído (variando de 0,4 a 1,0) foi ponderado em função da espessura de ocorrência da respectiva litologia;
3. Identificação da profundidade do nível d'água e atribuição do valor que varia de 0,6 a 1,0.

Nesse contexto, o índice de vulnerabilidade é obtido pelo produto da multiplicação dos valores atribuídos a cada parâmetro ($G \times O \times D$). O resultado pode variar de 0 a 1, indicando as classes de vulnerabilidade natural: desprezível, baixa, média, alta ou extrema (Figura 16). Esses referidos índices pontuais foram obtidos na presente pesquisa a partir de dados de poços e também de modelos geoeletricos inversos. Cabe ressaltar que os resultados obtidos possuem limitações quanto à sazonalidade do aquífero, assim como àquelas eventualmente intrínsecas ao método geoeletrico abordado.

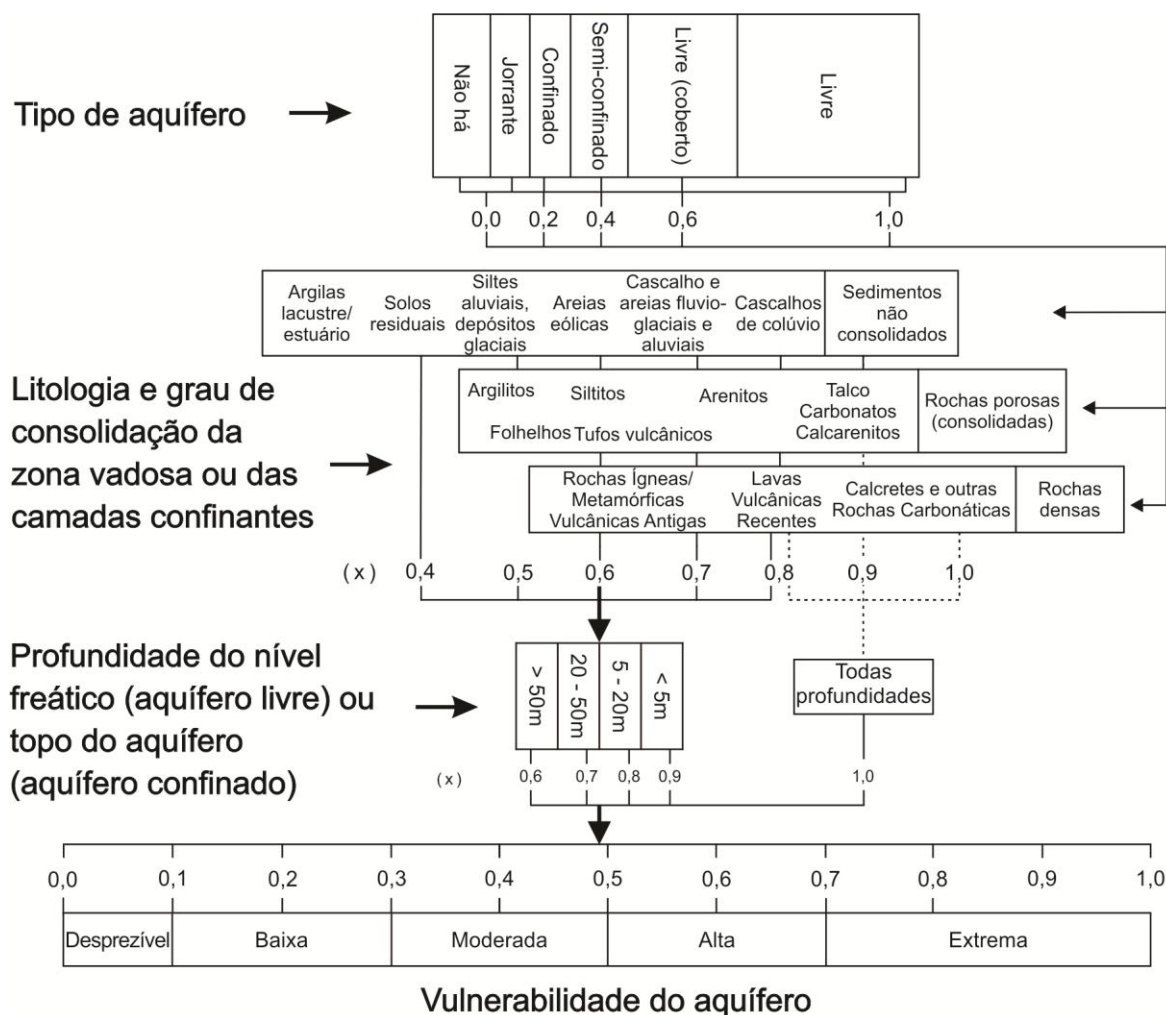


Figura 16: Fluxograma para obtenção do índice de vulnerabilidade natural de aquíferos, conforme metodologia GOD (Foster *et al.*, 2006).

As cartografias para a análise do grau de proteção e vulnerabilidade do Aquífero Barreiras na área de estudo foram então obtidas a partir dos dados dos modelos geoeletricos das SEV's e dos índices locais de vulnerabilidade, mediante interpolação e gridagem desses dados utilizando-se o software SURFER (SURFER, 2002). Esse processo de interpolação e gridagem foram efetuados mediante a metodologia da Krigagem, o qual faz uso de uma dependência espacial entre as observações, com variância e erros mínimos (Christakos, 2000; Loureiro & Lisboa, 2011).

A metodologia GOD é uma técnica amplamente divulgada pela literatura especializada (Mendonza & Barmen, 2006; Debernardi *et al.*, 2008; Martinez-Bastista *et al.*, 2010; Kemerich *et al.*, 2011; Fernandes *et al.*, 2014). Possui resultados satisfatórios mediante a interação desses três parâmetros de análise para a obtenção do índice de vulnerabilidade.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante da metodologia apresentada, tem-se como produto principal da presente pesquisa a análise do grau de proteção do Aquífero Barreiras através do parâmetro geoeletrico de Dar Zarrouk condutância longitudinal (S), oriunda da aquisição geofísica. Esta será confrontada com o mapa de vulnerabilidade natural, abalizado na metodologia GOD. Neste aspecto, os resultados gerais envolvem:

1. Informações de poços cadastrados em banco de dados hidrogeofísicos, abrangendo a área da bacia do Rio Catu e adjacências;
2. Dados de sondagens elétricas verticais (SEV's) e identificação dos parâmetros geoeletricos da ZNS, fundamentado em modelos inversos dessas SEV's;
3. Análise e classificação do grau de proteção intrínseca do aquífero, mediante o cálculo e elaboração do mapa relacionado ao parâmetro condutância longitudinal;
4. Confronto do mapa de condutância longitudinal com uma cartografia de vulnerabilidade natural fundamentada na metodologia GOD;
5. Contextualização dos mapas de grau de proteção e vulnerabilidade do aquífero frente a uma cartografia de concentração de nitrato das águas subterrâneas.

Os resultados a serem apresentados contaram ainda com imagens de satélite disponibilizadas pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte (SEMARH-RN).

6.1. Dados de poços

Foram selecionados 27 poços provenientes do banco de dados hidrogeofísicos do Departamento de Geofísica /UFRN a cerca da área em estudo (Figura 17), os quais possuem informações de perfis litológicos e construtivos, além de altimetria (anexo).

Informações a respeito do nível estático indicam a dimensão da zona não saturada, particularmente fundamental na proteção física do aquífero e, portanto, primordial na análise de proteção das águas subterrâneas (Tabela 3), visto que neste intervalo hidroestratigráfico envolvem os principais processos de degradação e retenção de eventuais cargas contaminantes. Além disso, deve-se levar em conta o fator litológico deste meio, visto que em meios de composição mais arenosa, o contaminante possui mobilidade vertical acentuada, quando comparada com meios de composição mais argilosa, conforme reportado.

Tabela 3: Localizações geográficas dos poços e os respectivos valores de espessuras da zona não saturada (ZNS) na área da bacia do Rio Catu-RN e adjacências.

Nome do poço cadastrado	UTM N (m)	UTM E (m)	Poço	ZNS (m)	Cota (m)
CANG 12	9295414	261805	1	39,5	74
FP-858	9295700	260700	2	38,1	78
PT-18 CAN	9295730	262228	3	31,1	72
FP-599	9297750	259650	4	27,0	70
FP-1369	9298000	263700	5	30,3	58
FP-741	9298000	268300	6	1,8	29
FP-1398	9299000	269500	7	6,4	37
PZ-03CAT	9301108	262828	8	4,8	33
PT02VFL	9301274	270137	9	26,6	42
VFL_01	9301458	269926	10	7,5	28
FP-712	9301600	273700	11	19,2	37
FP-1402	9301700	270100	12	21,9	37
CANG BAR 05	9301874	273886	13	41,4	46
PT-65 CAT	9302466	265282	14	19,5	47
PZ-04CAT	9302750	265294	15	17,0	50
FP-1311	9303300	254200	16	27,4	67
FP-1033	9304700	256700	17	31,8	77
PZ-02CAT	9305004	263328	18	28,3	52
FP-730	9306400	262300	19	23,0	50
GOI 03	9306856	257150	20	3,6	22
FP-1100	9309000	263000	21	33,3	47
PZ-01CAT	9310196	267915	22	28,9	37
FP-1309	9310500	261000	23	11,4	19
TBS 2BPIP	9310644	273679	24	29,4	39
FP-816	9310800	272950	25	19,9	29
FP-1276	9311900	265000	26	5,7	20
FP-1287	9313000	267200	27	24,5	11

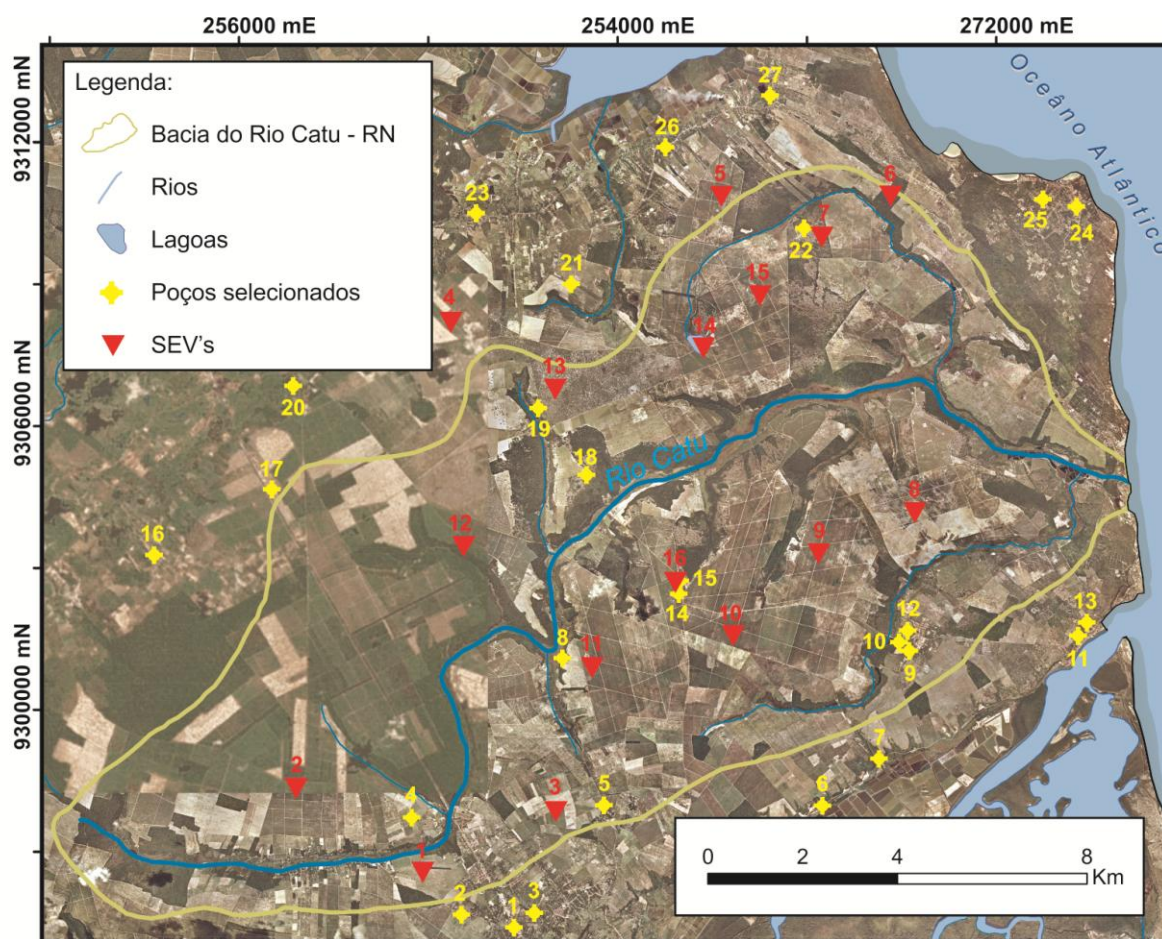


Figura 17: Localização dos poços com perfil litológico e de sondagens geoeletricas (imagem de satélite disponibilizada pela SEMARH-RN).

6.2. Dados de sondagens elétricas verticais (SEV's) disponibilizadas

A aplicação da técnica geofísica em questão consiste na obtenção da curva de variação do parâmetro resistividade elétrica em função das profundidades investigadas, indicadas de forma indireta pelas aberturas dos eletrodos usadas durante a aquisição, conforme reportado no capítulo 5 da presente dissertação. A posterior interpretação foi realizada obedecendo ao princípio de que a distribuição do parâmetro físico no subsolo seja correspondente a um meio estratificado horizontalmente.

Foram utilizados dados de 16 sondagens elétricas verticais executadas na área em estudo (Tabela 4), as quais possuem uma abertura máxima de eletrodos de corrente (AB) igual a 1,2km (levantamento geofísico executado pelo projeto de pesquisa CNPq referente ao processo de número 573462/2008-9). As SEVs foram executadas ao final do período de estiagem da região, associados com níveis freáticos mais profundos. Os valores de espessuras da zona não saturada apresentados na Tabela 4 derivam da inversão dos dados geoeletricos.

Este levantamento geofísico procurou contemplar toda a área selecionada para o estudo, sobretudo aquelas onde as informações de perfis de poços eram reduzidas ou mesmo ausentes.

Tabela 4: Localização geográfica das 16 SEV's disponibilizadas com seus respectivos valores de espessura da zona não saturada interpretada.

SEV	UTM X (m)	UTM Y (m)	Cota (m)	Espessura não saturada (m)
1	259948	9296646	76	19,6
2	257278	9298415	105	66,0
3	262757	9297930	75	32,0
4	260539	9308256	60	12,0
5	266251	9310920	49	17,0
6	269823	9310928	46	25,5
7	268370	9310058	54	4,7
8	270330	9304236	44	25,0
9	268304	9303375	43	6,5
10	266500	9301640	52	11,2
11	263523	9300966	50	24,6
12	260812	9303524	65	7,0
13	262745	9306840	60	20
14	265875	9307718	84	34
15	267062	9308822	57	3,0
16	265282	9302766	47	19,5

No tocante à análise qualitativa, as curvas geoeletricas e os modelos geoeletricos obtidos a partir das SEV's apresentam-se de forma consistente com o contexto hidrogeológico local, assinalados pelos perfis de poços cadastrados. Conferem-se variações de resistividades nos níveis mais superficiais entre $140\Omega\text{m}$ e $2000\Omega\text{m}$, associadas à alternância de litologias predominantemente argilosas e arenosas, respectivamente. Analogamente, têm-se respostas geoeletricas congruentes a respeito da zona de saturação, com resistividades de $500\Omega\text{m}$ a $900\Omega\text{m}$ para as camadas mais arenosas. As aberturas de eletrodos utilizadas possibilitaram uma profundidade de investigação abrangendo até o embasamento hidrogeológico do Aquífero Barreiras. Este representa a porção superior da sequência carbonática regional e tem um caráter geoeletrico condutivo (resistividades da ordem de $50\Omega\text{m}$). Algumas SEV's (SEV's 4, 5, 6 e 11) evidenciam uma resposta geoeletrica compatível com rochas carbonáticas mais puras em profundidades maiores, caracterizadas por uma tendência ascendente no ramo final das curvas geoeletricas, com resistividades maiores que $1500\Omega\text{m}$.

Considerando informações provenientes da calibração geolétrica no contexto da Formação aquífera Barreiras (Lucena, 2005), os dados de campo foram processados e interpretados no software IPI2Win, versão 2.1 (Bobachevet *al.*, 2000), através da elaboração de modelos geolétricos 1D envolvendo estratigrafias geolétricas de resistividades x espessuras (figuras 18 ao 33).

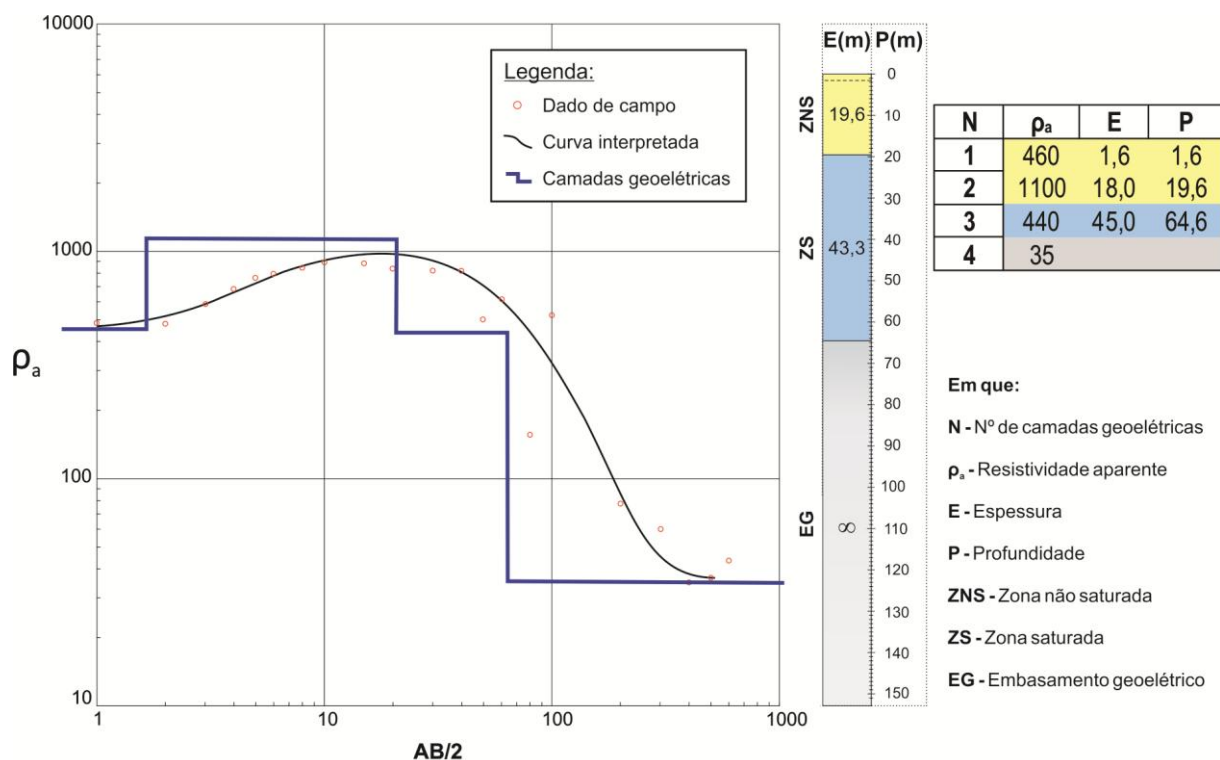


Figura 18: SEV – 01

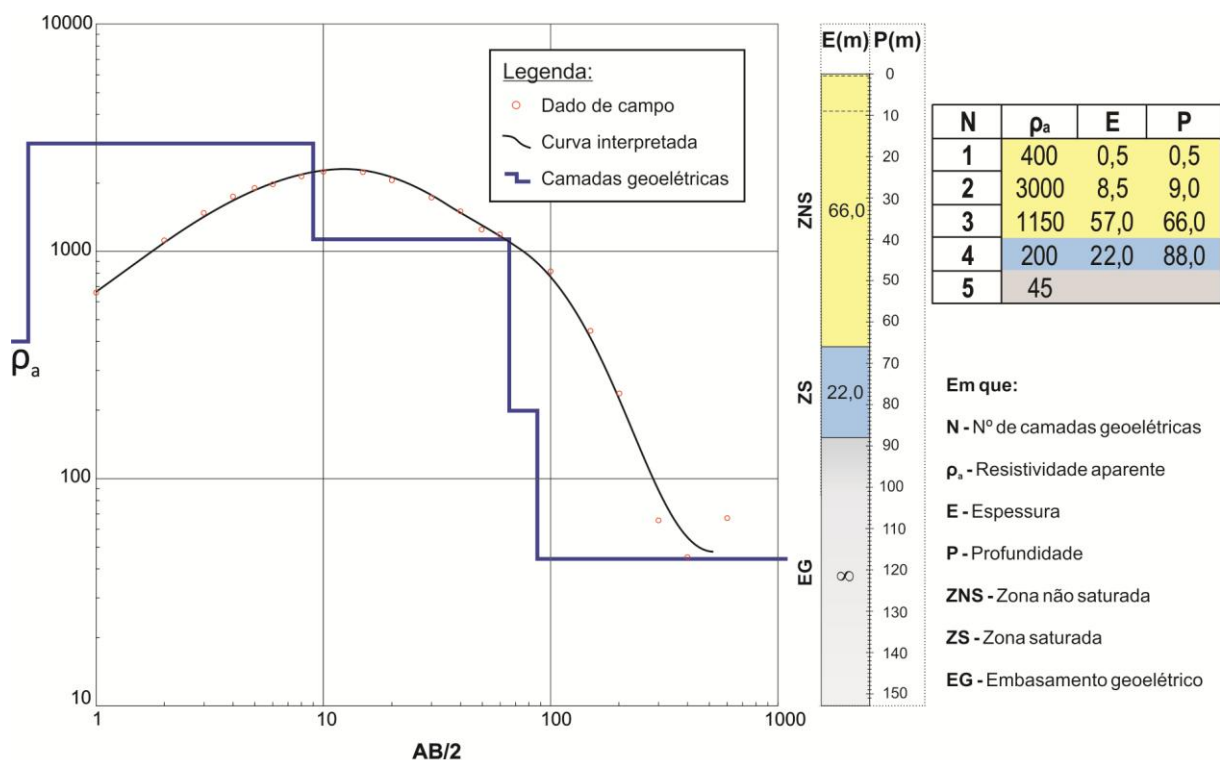


Figura 19: SEV – 02

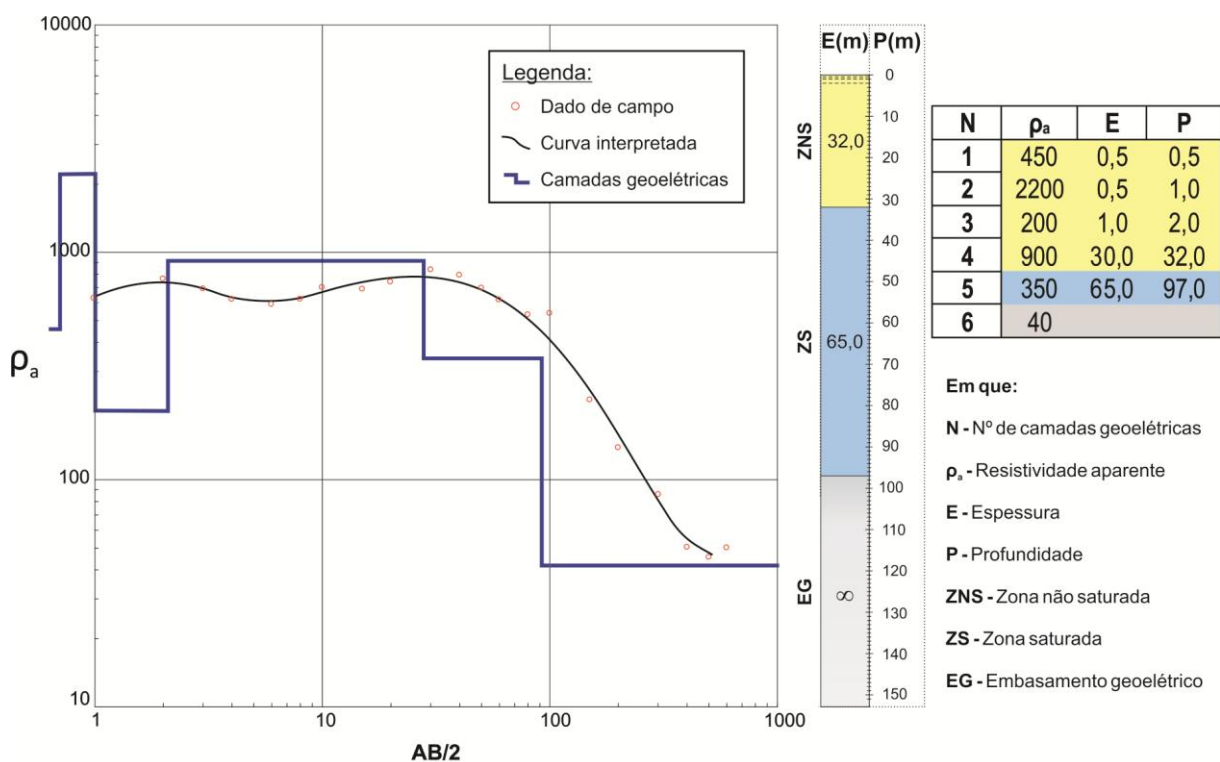


Figura 20: SEV – 03

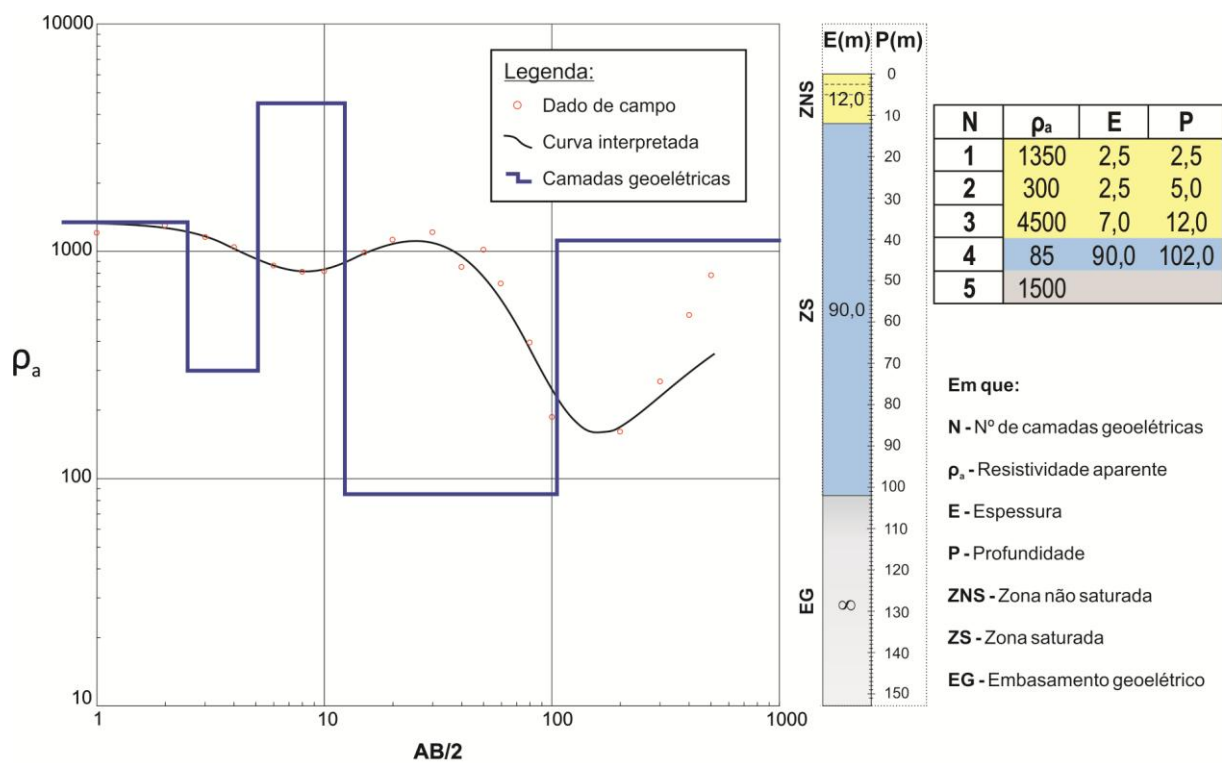


Figura 21: SEV - 04

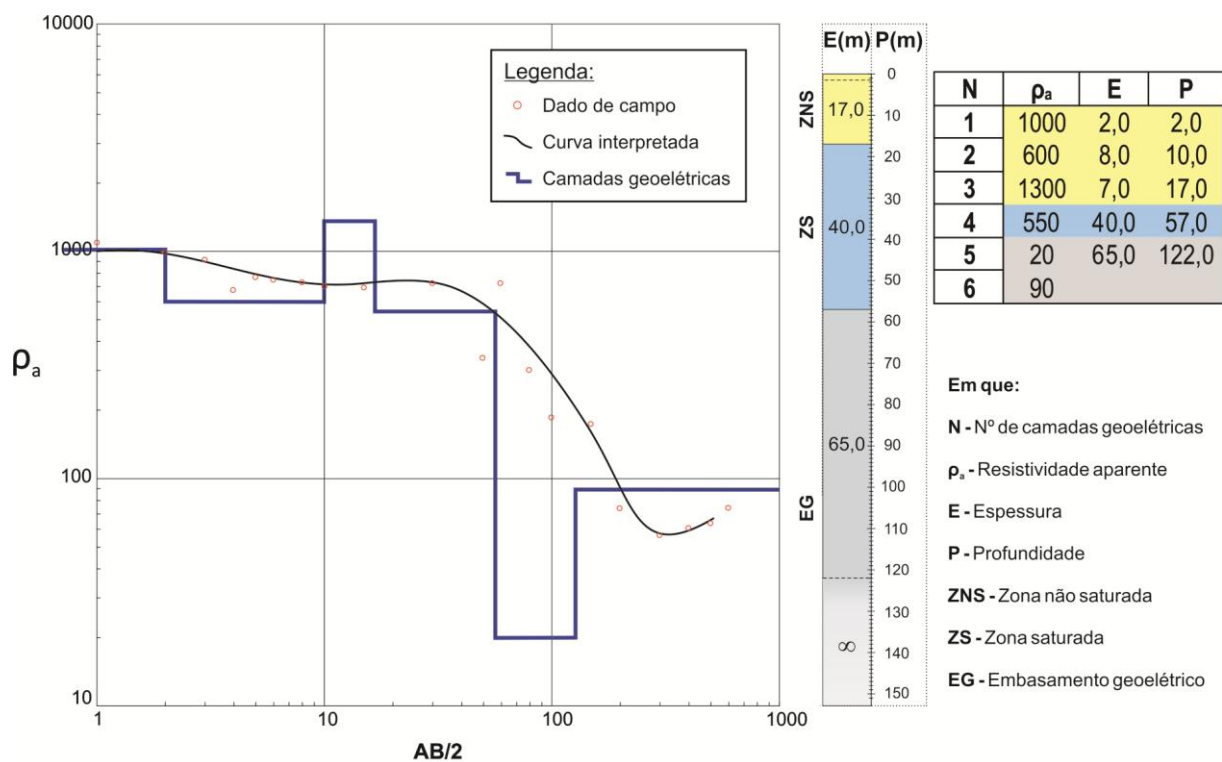


Figura 22: SEV - 05

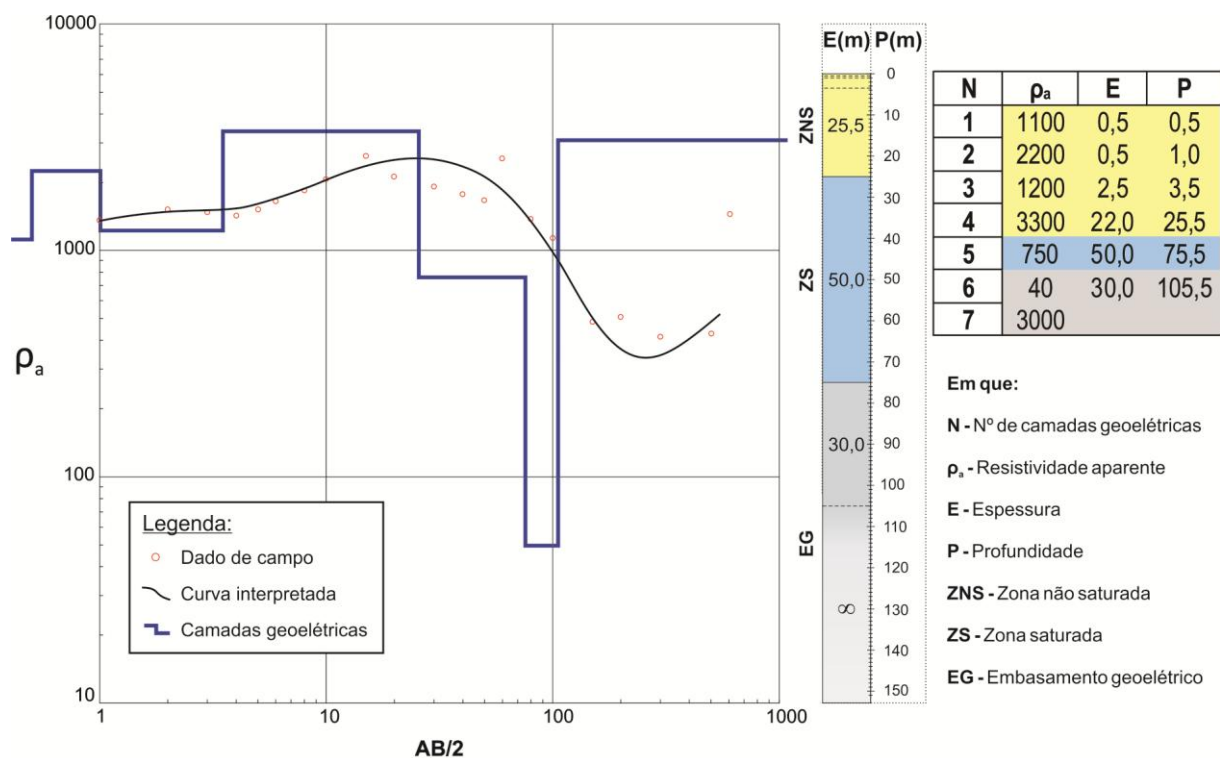


Figura 23: SEV - 06

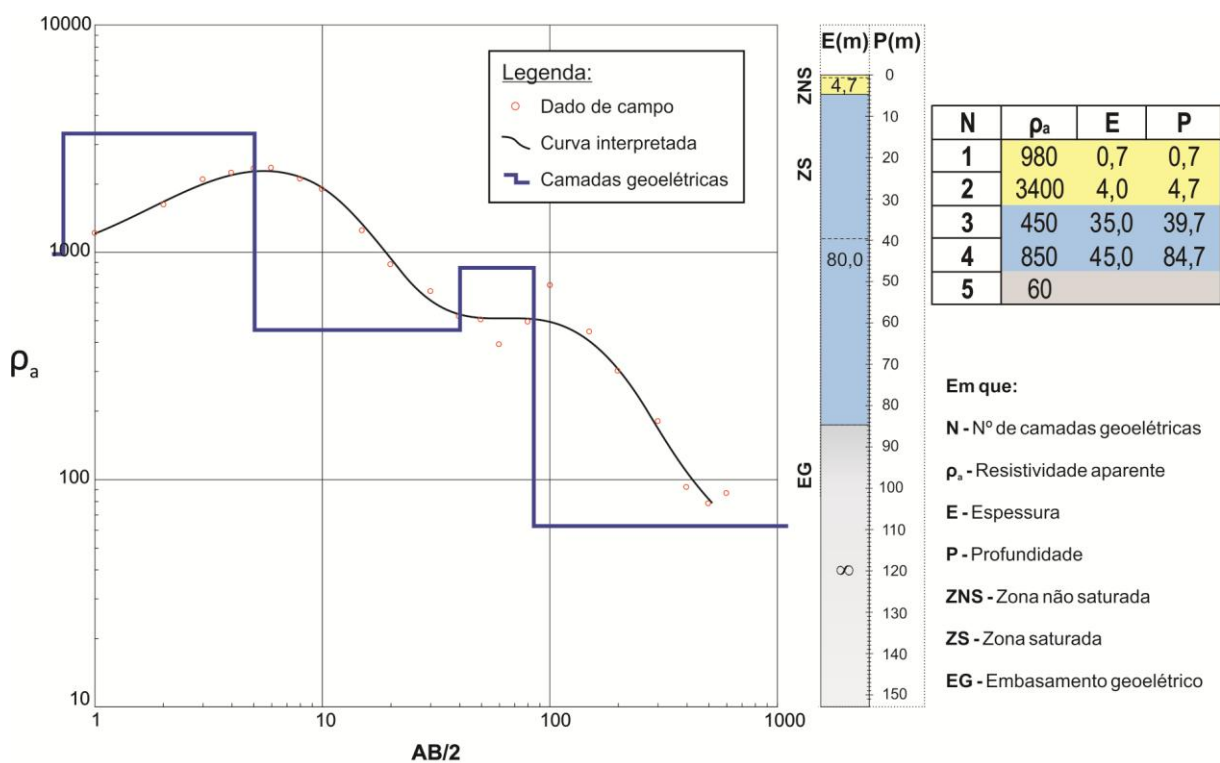


Figura 24: SEV - 07

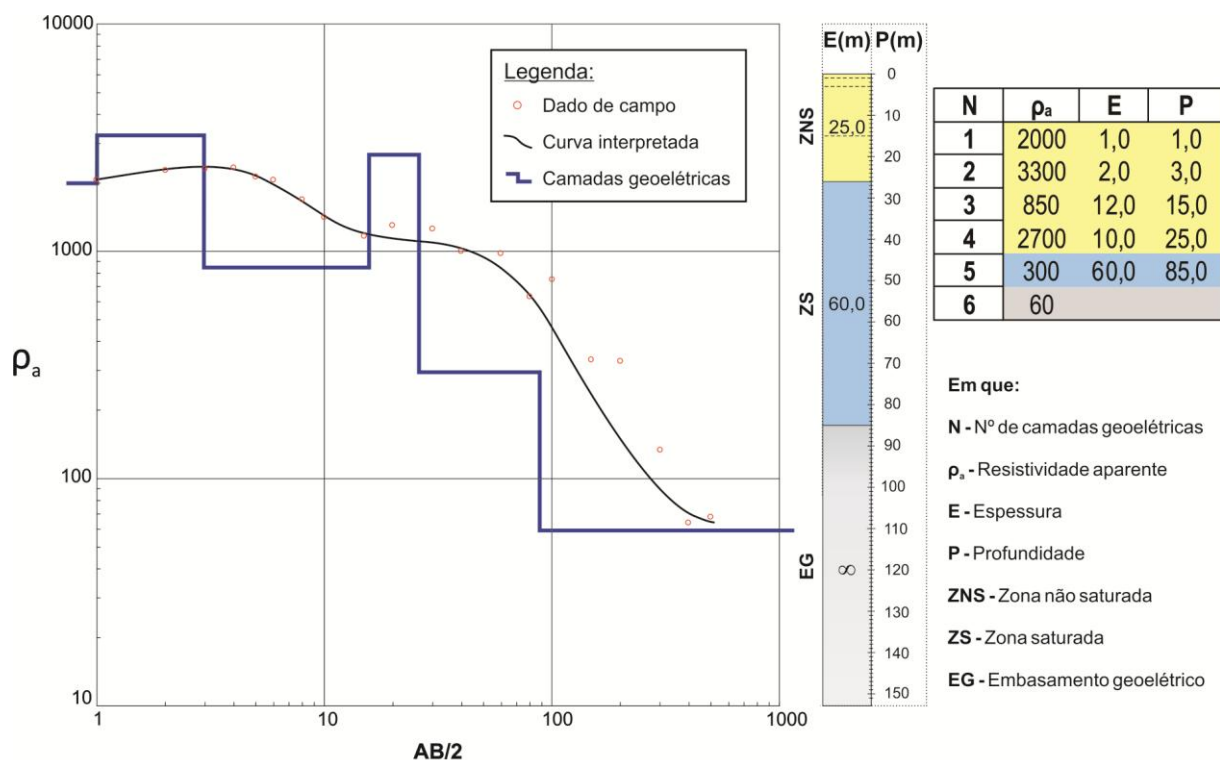


Figura 25: SEV – 08

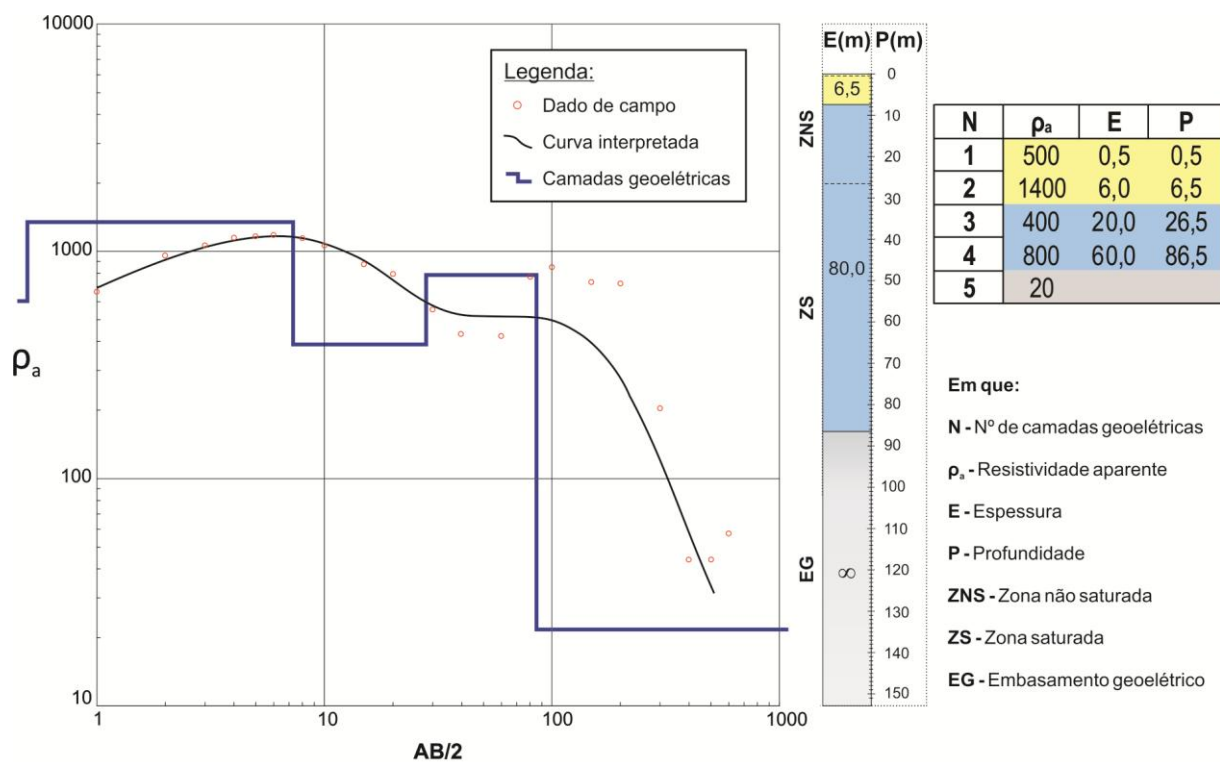


Figura 26: SEV – 09

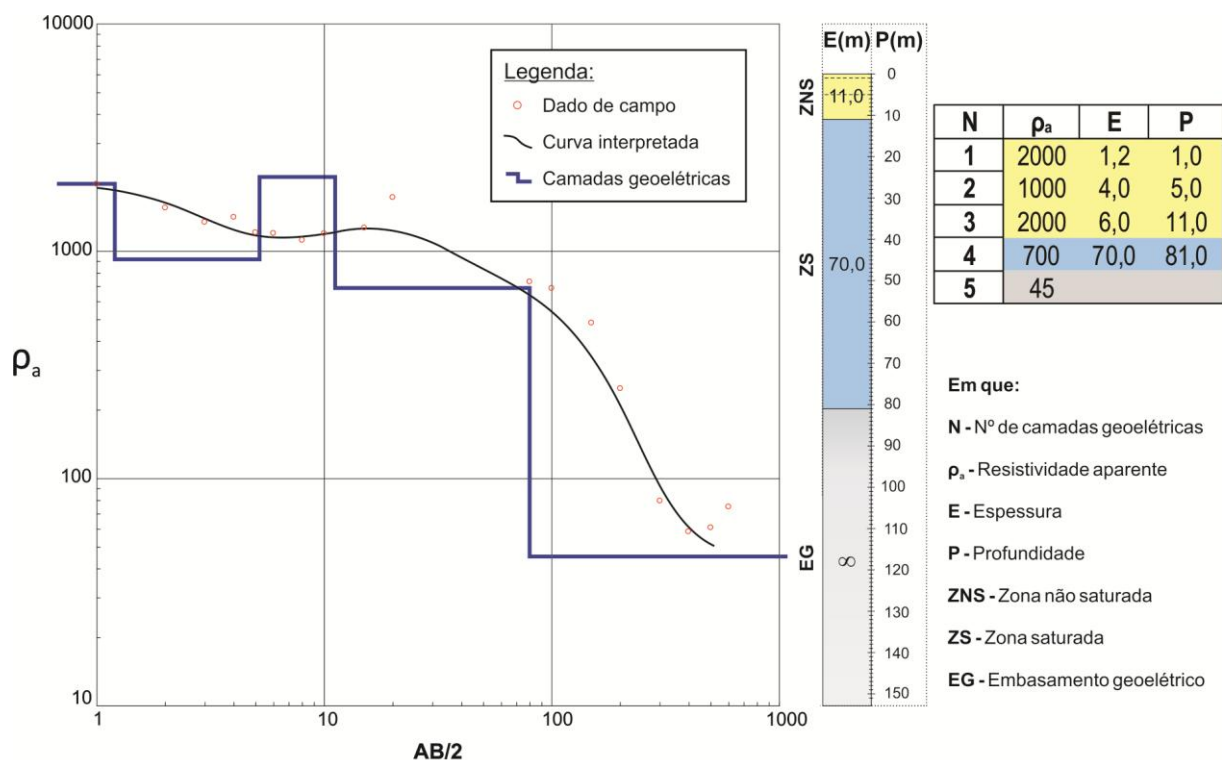


Figura 27: SEV – 10

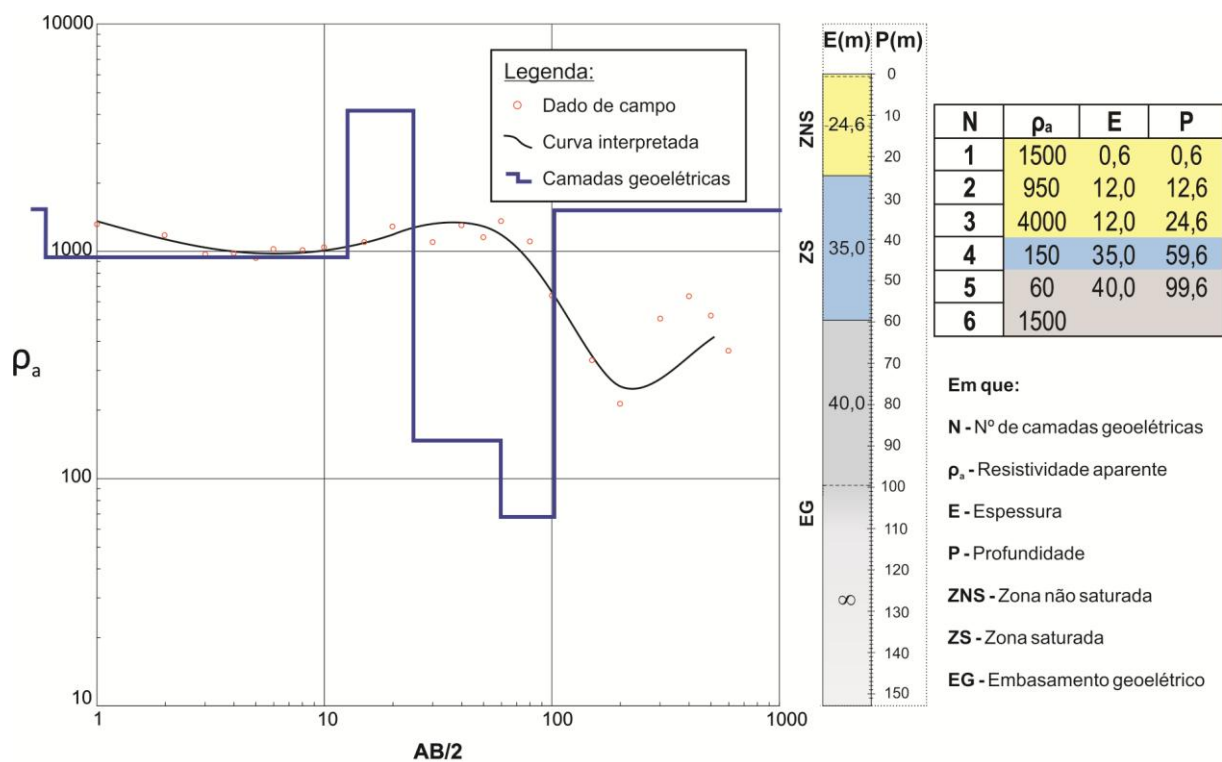


Figura 28: SEV – 11

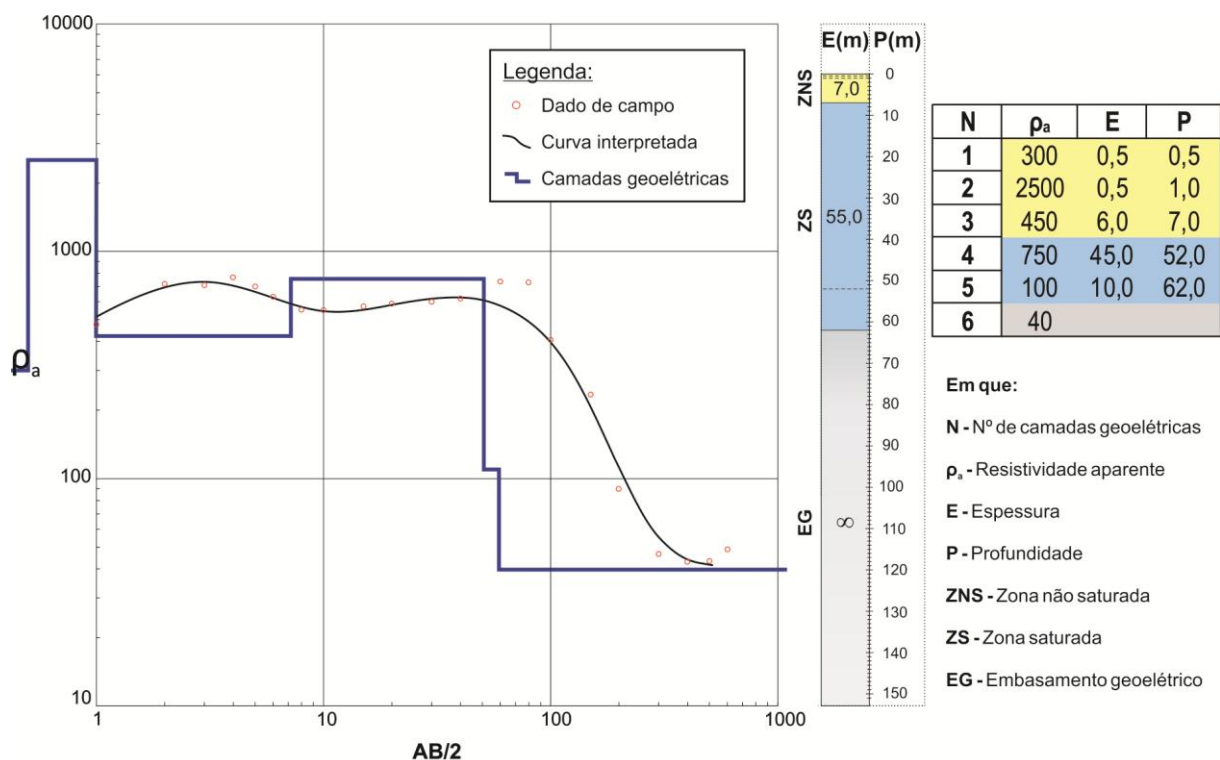


Figura 29: SEV – 12

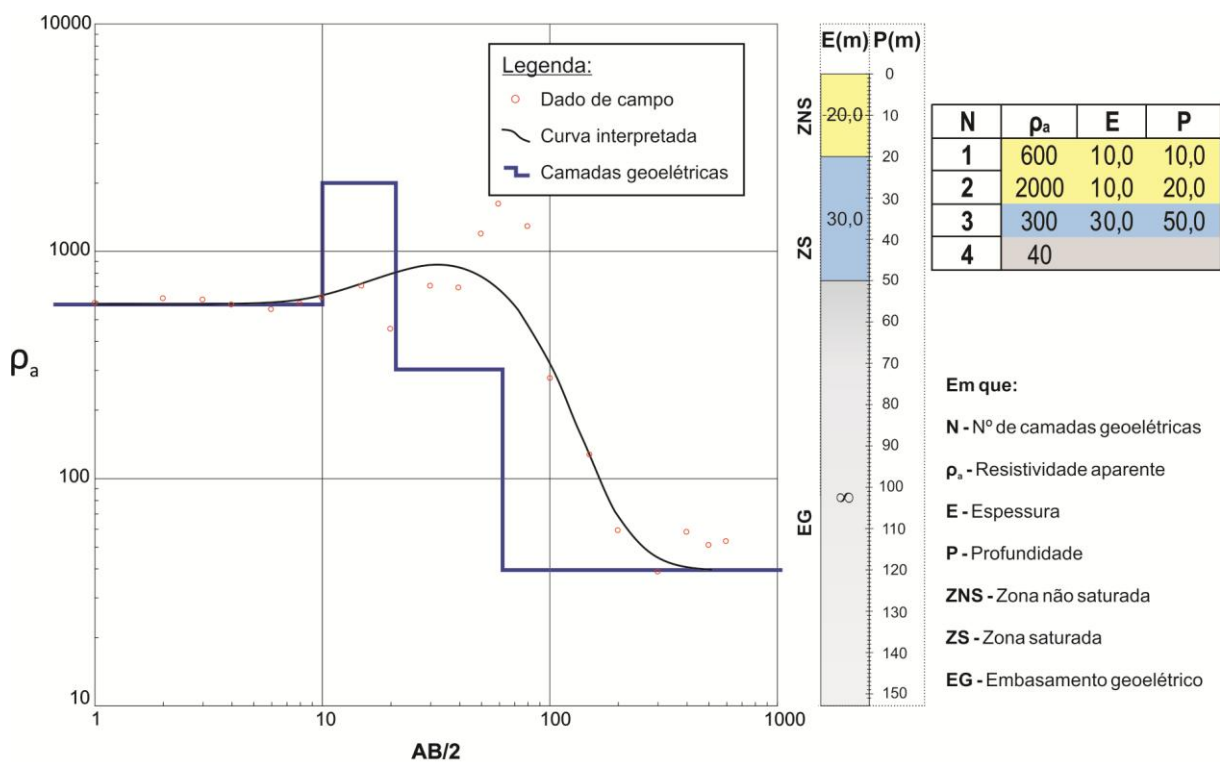


Figura 30: SEV – 13

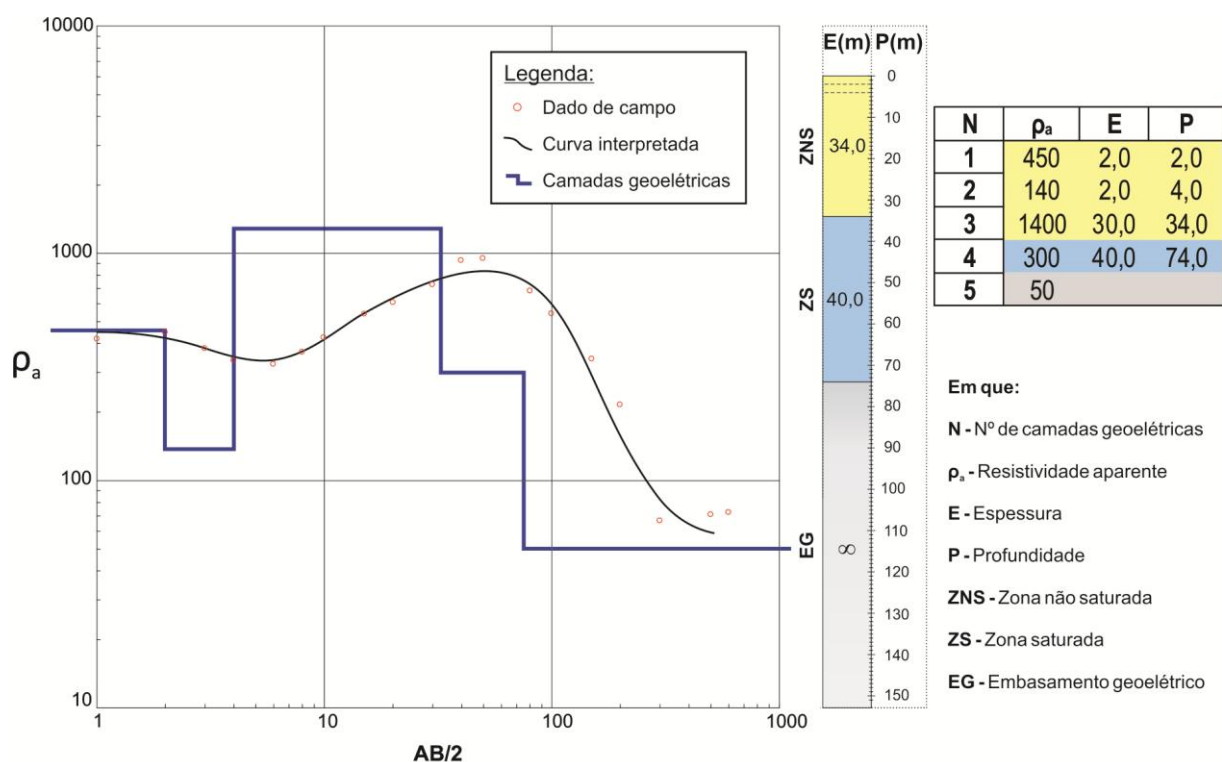


Figura 31: SEV – 14

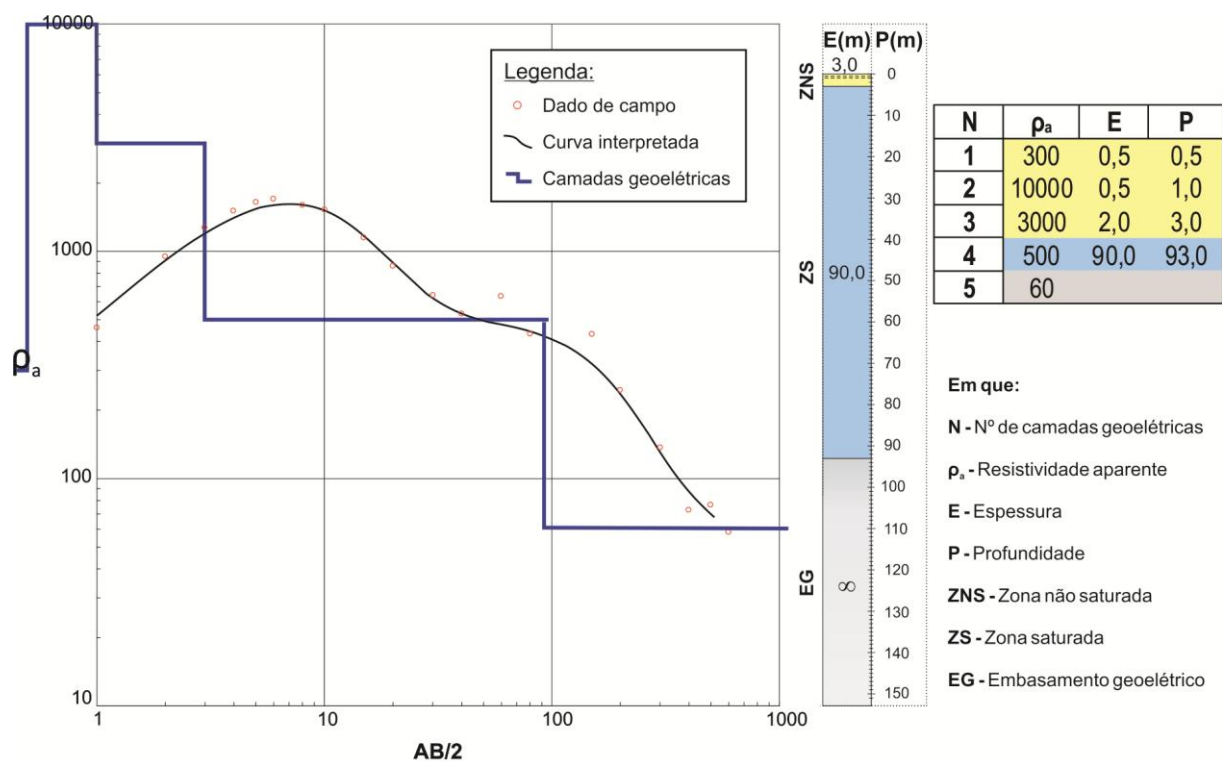


Figura 32: SEV – 15

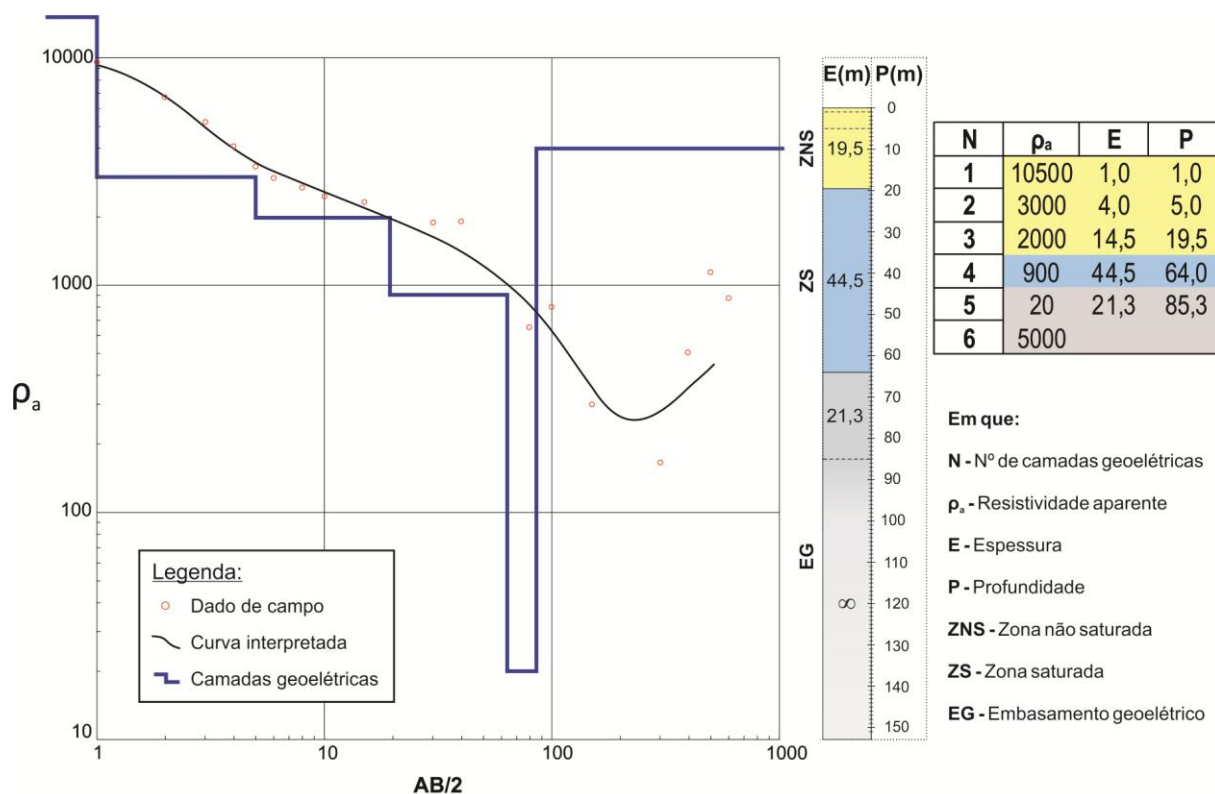


Figura 33: SEV – 16

Os modelos geoeétricos ora obtidos viabilizaram a elaboraçaõ do mapa de condutância longitudinal (S), além de contribuírem na confecção do mapa de vulnerabilidade, aliado aos dados dos perfis de poços.

6.3. Condutância longitudinal (S) e análise do grau de proteção intrínseca do aquífero

Considerando a incorporação de vínculos provenientes da hidroestratigrafia local e de calibrações geoeétricas, foram discriminadas as camadas correspondentes à zona não saturada, com seus respectivos valores de espessura e resistividade. Posteriormente, efetuou-se o cálculo da condutância longitudinal (S) para cada SEV executada, com ênfase na zona não saturada, tendo em vista o caráter hidráulico do aquífero predominantemente não confinado. Os valores de espessuras não saturadas com as respectivas resistividades foram aplicados na Equação 12 (ver tópico 5.1.4 do presente documento). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5, onde se têm os valores de espessura (h_1 , h_2 e h_3) e resistividade (ρ_1 , ρ_2 e ρ_3) dos respectivos horizontes geoeétricos interpretados para cada SEV, bem como os valores de S calculados.

Tabela 5: Condutância longitudinal (S) das SEV's analisadas neste estudo, referente à zona não saturada.

SEV	Espessura não saturada (E_i) em metros				Resistividade aparente (ρ_i) em Ohm.m				Condutância Longitudinal (S_i) $S_i = \sum_i \frac{E_i}{\rho_i}$
	E_1	E_2	E_3	E_4	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	
1	1,6	18,0	-	-	460	1100	-	-	19,8 mS
2	0,5	8,5	57,0	-	400	3000	1150	-	53,6 mS
3	0,5	0,5	1,0	30,0	450	2200	200	900	39,7 mS
4	2,5	2,5	7,0	-	1350	300	4500	-	11,7 mS
5	2,0	8,0	7,0	-	1000	600	1300	-	20,7 mS
6	0,5	0,5	2,5	22,0	1100	2200	1200	3300	9,4 mS
7	0,7	4,0	-	-	980	3400	-	-	1,9 mS
8	1,0	2,0	12,0	10,0	2000	3300	850	2700	18,9 mS
9	0,5	6,0	-	-	500	1400	-	-	5,3 mS
10	1,2	4,0	6,0	-	2000	1000	2000	-	7,6 mS
11	0,6	12,0	12,0	-	1500	950	4000	-	16,0 mS
12	0,5	0,5	6,0	-	300	2500	450	-	15,2 mS
13	10,0	10,0	-	-	600	2000	-	-	21,7 mS
14	2,0	2,0	30,0	-	450	140	1400	-	40,2 mS
15	0,5	0,5	2,0	-	300	10000	3000	-	2,4 mS
16	1,0	4,0	14,5	-	10500	3000	2000	-	8,7 mS

6.3.1. Mapa de condutância longitudinal

Os dados provenientes do cálculo de condutância longitudinal expostos na Tabela 5 foram submetidos a uma interpolação, mediante a metodologia de Krigagem, com vistas a possibilitar a obtenção de uma cartografia de condutância longitudinal.

Ressaltando-se que o parâmetro condutância longitudinal é o quociente entre os fatores resistividade e espessura, particularmente no presente estudo da zona não saturada, um meio com valores de "S" reduzidos é associado com espessuras relativamente reduzidas e/ou resistividades elevadas. Estas últimas compatíveis com sedimentos ou rochas sedimentares de composição predominantemente arenosa. Esse litotipo proporciona taxas de infiltração mais elevadas, refletindo uma maior permeabilidade vertical, o que torna o meio aquífero mais

susceptível de ser alcançado por uma eventual carga contaminante. Já as subáreas em que o parâmetro S é mais elevado, tem-se um meio aquífero mais protegido, uma vez que se tem espessuras sobrepostas ao aquífero mais elevadas. Esse cenário confere um filtro de percolação da carga contaminante mais espesso, protegendo a água subterrânea. Alternativamente, o valor de S elevado pode estar relacionado com resistividades reduzidas da zona não saturada, fato este característico de litologias predominantemente argilosas, com menor permeabilidade vertical. Nesse caso, a acessibilidade hidráulica à zona saturada por uma determinada carga contaminante é dificultada.

Nesse contexto, o mapa da Figura 34 evidencia a variação dos valores obtidos a partir da interpolação dos dados de "S", variando desde 5 mS até 55 mS. Adotando-se como valor de referência intermediário a isolinha de 20 mS, verifica-se que, em linha gerais, o Aquífero Barreiras encontra-se menos protegido nos setores nordeste e centro-leste do mapa, com condutâncias longitudinais em torno de 10 mS, em detrimento aos valores de "S" maiores que 30 mS do setor sudoeste, associados com um grau de proteção relativamente mais elevado do referido manancial.

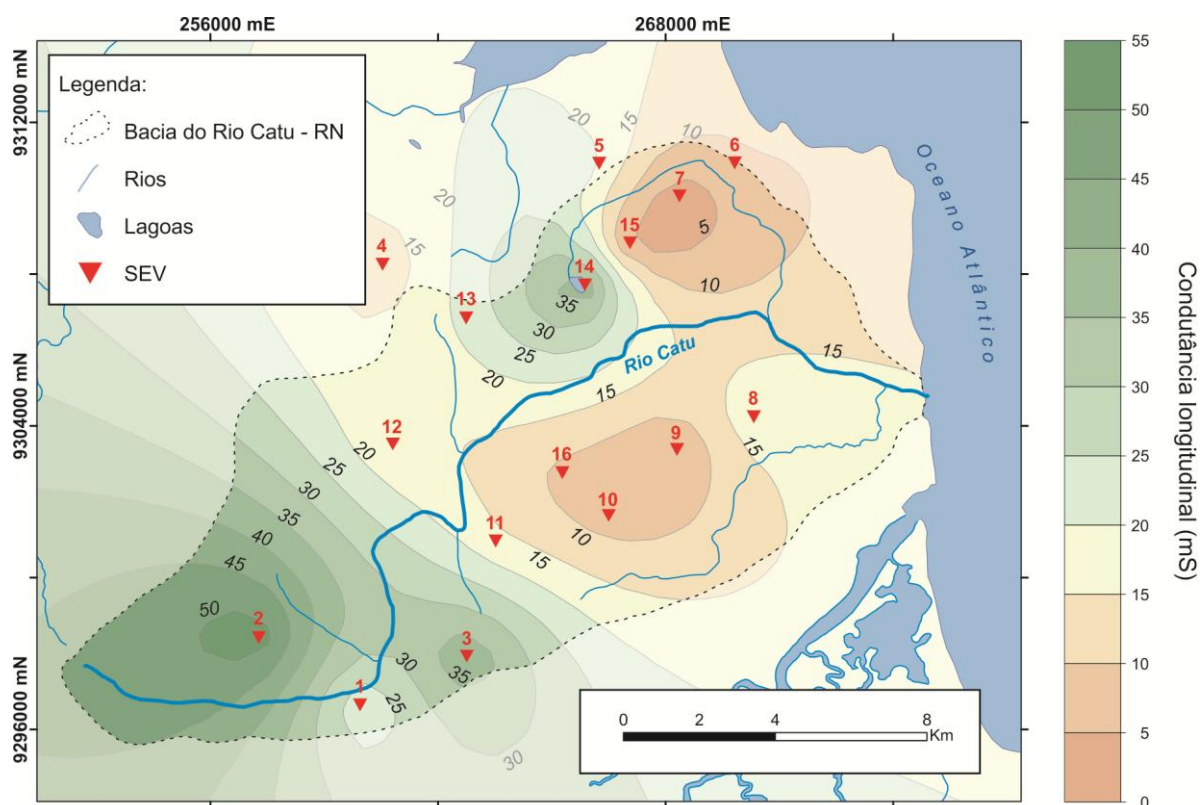


Figura 34: Mapa de condutância longitudinal (S) da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN. As isolinhas apresentam os valores de S em mS (10^{-3} Siemens).

Considerando-se particularmente apenas uma cartografia de espessura da zona não saturada adjacente ao aquífero (Figura 35), obtida a partir de dados de poços e SEV's,

verifica-se que o parâmetro "S" acha-se primordialmente influenciado pela variação dimensional dessa zona não saturada, em detrimento à sua própria composição litológica. Neste aspecto, as maiores proteções do aquífero devem-se principalmente às espessuras não saturadas iguais ou superiores a 30 m.

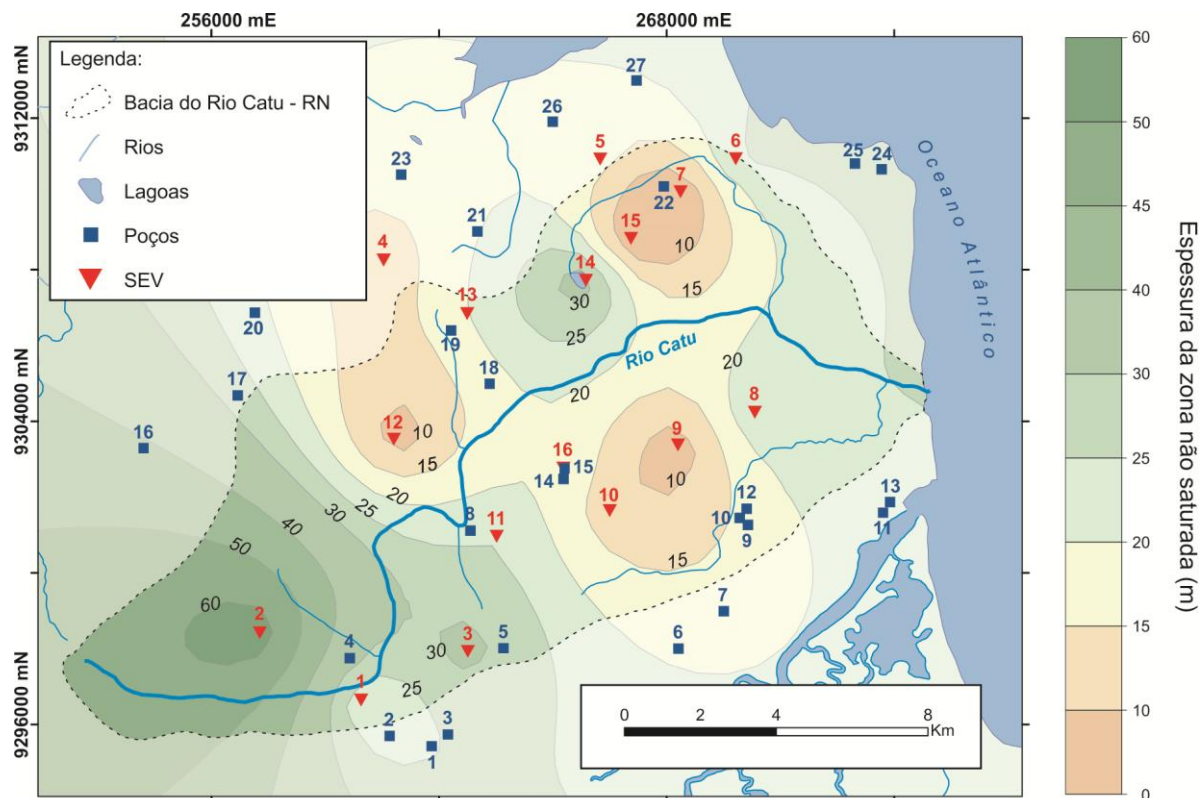


Figura 35: Mapa de espessura da zona não saturada (ZNS) da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN.

Tratando-se de uma análise de grau de proteção de um aquífero não confinado a partir de valores oriundos do levantamento geolétrico, contudo, verifica-se a sensibilidade da referida metodologia no tocante a ocorrência de precipitações pluviométricas previamente ao levantamento de campo.

Nesse aspecto, a obtenção de dados geolétricos (e posterior determinação de condutâncias longitudinais) em dias que se seguem à ocorrência de precipitações pluviométricas podem conduzir a interpretações geolétricas equivocadas, sobretudo no tocante a valores de resistividades aparentes de camadas da zona não saturada e suas respectivas litologias associadas. Dessa forma, valores aparentemente reduzidos de resistividades podem estar associados com a presença de umidade residual adicional presente na zona não saturada e não apenas decorrente da ocorrência de camadas mais argilosas que viriam a conferir mais proteção ao aquífero.

De maneira análoga, levantamentos geoeletricos realizados ao final do período de estiagem anual na região podem induzir a interpretações geoeletricas que resultem em valores superestimados em termos de espessuras da zona não saturada. Tal observação é corroborada com elevadas velocidades de infiltração na zona vadosa determinadas por Lucena *et al.* (2013a), em testes de infiltração executados na área da bacia do Rio Catu-RN.

A Figura 36 evidencia uma síntese das subáreas inseridas na bacia hidrográfica do Rio Catu-RN, mais susceptíveis de contaminação do Aquífero Barreiras, com base na análise da condutância longitudinal.

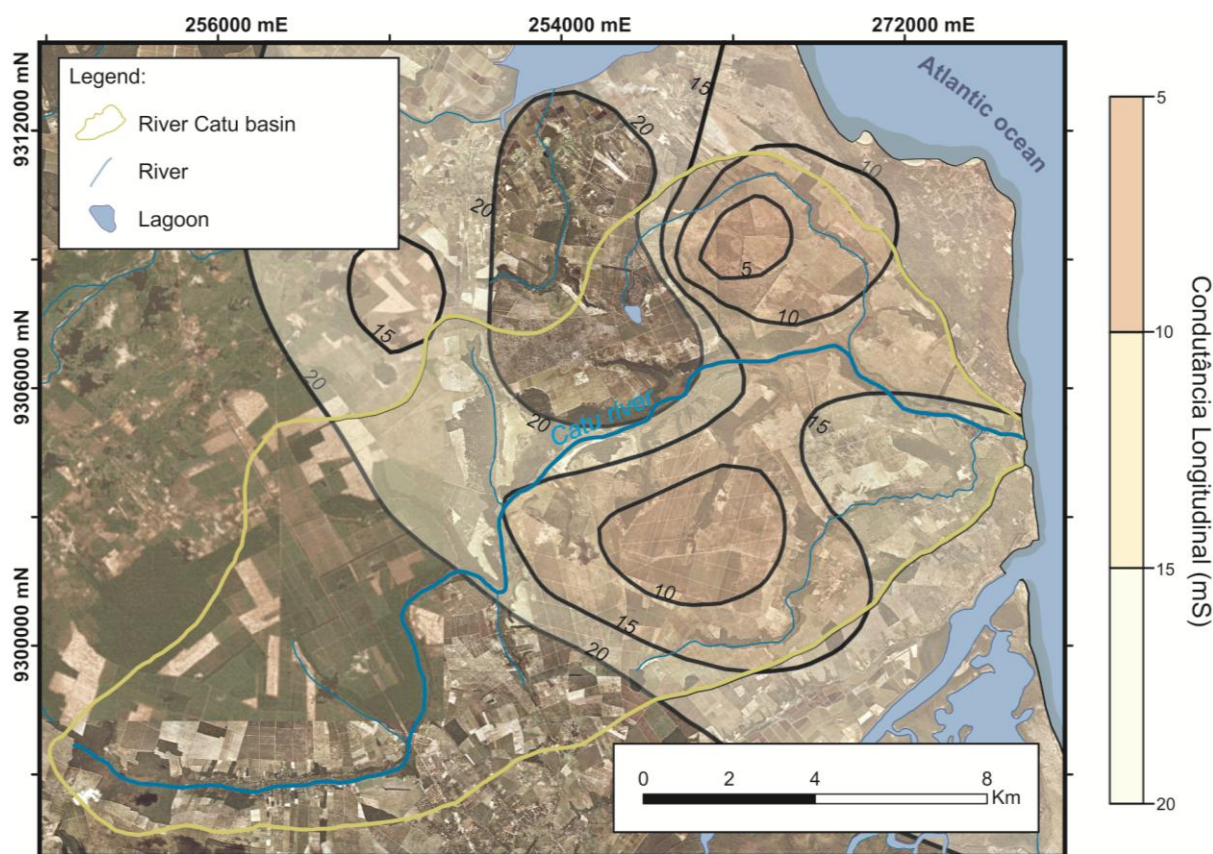


Figura 36: Subáreas mais susceptíveis a contaminação do Aquífero Barreiras, com base na análise do parâmetro geoeletrico condutância longitudinal.

6.3.2. Classificação do grau de proteção intrínseca do aquífero

Com base nos dados geoeletricos ora apresentados, pode-se, adicionalmente, propor uma classificação do grau de proteção do Aquífero Barreiras em termos gráficos, correlacionando-se em conjunto os parâmetros de espessura e resistividade, representativas da zona não saturada, além dos próprios valores de condutância longitudinal (Figura 37). Essa configuração gráfica ternária para análise de proteção de aquíferos foi proposta inicialmente por Braga (2008), embora tenha esse autor considerado à presença de aquitardo sobrejacente

ao aquífero analisado, em detrimento a um contexto de aquífero não confinado do presente estudo.

Nesse aspecto, ressalta-se que, em detrimento de valores individuais de resistividade das diferentes camadas geoeletricas da ZNS, foi considerada uma resistividade única representativa, adotando-se o conceito de pseudo-anisotropia descrito por Orellana (1972).

O referido autor propõe que as diferentes camadas, consideradas no modelo geofísico-matemático como homogêneas e isotrópicas, podem comportar-se como um meio único e anisotrópico de resistividade (ρ_m), sendo esta última resultante do produto entre a resistividade longitudinal e a transversal. Dessa forma, foi adotado um valor de resistividade representativo de toda a ZNS, corroborando com os valores de S obtidos, juntamente com a respectiva espessura não saturada (Figura 37).

Na referida análise gráfica, delimitou-se campos de baixo, intermediário e alto grau de proteção, em consonância com a configuração do mapa de condutância longitudinal exposto na Figura 34 (com valor intermediário adotado de 20 mS) e do aspecto dimensional da ZNS. Somado a isso, considerou-se a associação entre litologia e intervalo de resistividade aparente, a qual foi obtida pela análise da calibração geoeletrica (ver Tabela 2 na página 32).

Analizando-se o gráfico reportado, verifica-se em linhas gerais a preponderância do parâmetro espessura da zona não saturada em termos de proteção física intrínseca do manancial. Por outro lado, para situações de equivalência aproximada desse parâmetro nas distintas SEV's, o posicionamento destes no gráfico é determinado pela composição litológica (interpretada nos modelos geoeletricos e com base em calibrações geoeletricas). Nesse caso, tomando-se com exemplo as SEV-05 e SEV-16, verifica-se que as mesmas se equivalem no aspecto dimensional da espessura não saturada, porém suas classificações divergem em função dos valores de resistividade, visto que a ZNS identificada na SEV-05 é compatível com uma composição mais argilosa em relação àquela determinada na SEV-16. A preponderância dos valores da ZNS no enquadramento das classes ocorre, por sua vez, tomando-se como exemplo as SEV-10 e SEV-11. Nesse caso, tem-se uma equivalência nos valores de resistividade, no entanto suas classificações diferem em face da primeira apresentar uma ZNS mais delgada.

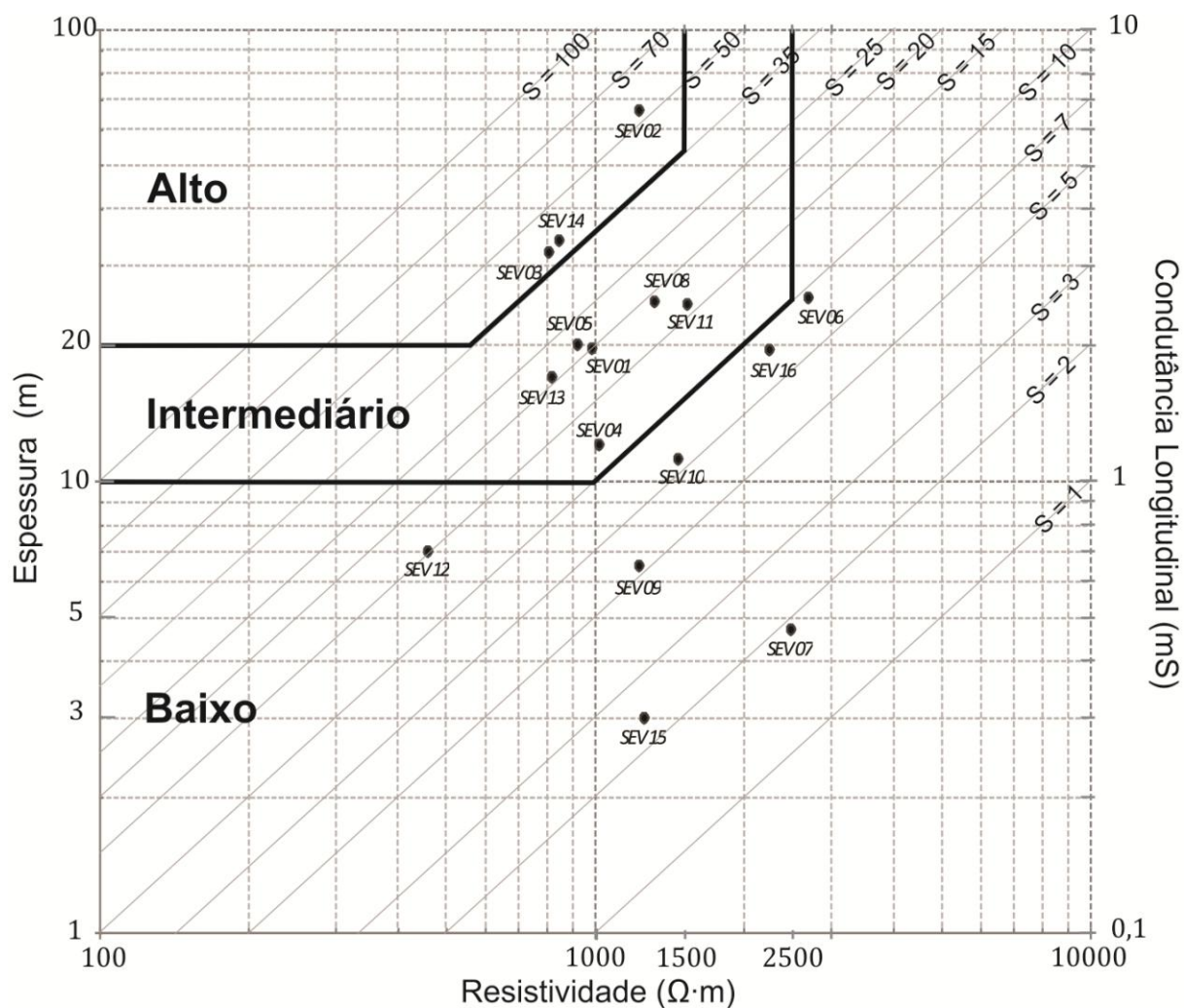


Figura 37: Classificação do grau de proteção intrínseca do Aquífero Barreiras (Alto, Intermediário e Baixo) para o contexto hidrogeológico da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN (adaptado de Braga, 2008).

6.4. Proposta do mapa de vulnerabilidade segundo a metodologia GOD a partir de dados de poços e geolétricos

A determinação dos índices de vulnerabilidade local do Aquífero Barreiras, embora fundamentada na metodologia GOD (Foster & Hirata, 1998), foi definida com base em dados hidrogeológicos e geofísicos, em detrimento apenas das informações hidrogeológicas da conceituação original do método. Dessa forma, os referidos parâmetros para determinação dos índices de vulnerabilidade foram obtidos em perfis de poços disponíveis (anexos a presente dissertação) e também provenientes de informações dos modelos inversos das sondagens geolétricas, previamente descritas. A adoção dessa metodologia multidisciplinar para a avaliação de vulnerabilidade decorreu do fato de que em algumas subáreas locais, as

informações de poços eram escassas ou mesmo inexistentes, situações estas em que as sondagens geoeletricas foram executadas.

Para os dados de poços, os parâmetros avaliados no índice GOD de vulnerabilidade (espessura da ZNS, litologia da ZNS e tipo de aquífero) foram obtidos de forma direta nos respectivos perfis de poços disponíveis. Entretanto, no tocante a análise desses parâmetros com base nos dados geofísicos utilizou-se as informações de calibração geoeletrica (tópico 5.1.2 do presente documento), com ênfase na zona não saturada. Nesse caso, o parâmetro da metodologia GOD associado com as características litológicas foram estabelecidas com pesos variando desde 0,5 a 0,7, conforme seu conteúdo mais argiloso ou mais arenoso, respectivamente (Tabela 6). A Tabela 7, por sua vez, expõe os índices de vulnerabilidade natural do Aquífero Barreiras, considerando este de caráter hidráulico livre ao longo de toda a área de estudo.

Tabela 6: Fatores de ponderação do método GOD, associados com os intervalos de resistividade aparente e características do meio considerado.

Resistividade aparente (ρ), em $\Omega \cdot m$	Fator de ponderação	Característica do meio litológico
$\rho < 1000$	0,5	Sedimentos e/ou rochas sedimentares de composição predominantemente argilosa;
$1000 < \rho < 2500$	0,6	Sedimentos e/ou rochas sedimentares de composição areno-argilosa a arenosa, respectivamente associados com valores menores e maiores de resistividade no intervalo considerado;
$\rho > 2500$	0,7	Sedimentos e/ou rochas sedimentares de composição arenítica grosseira a conglomerática.

Tabela 7: Pesos atribuídos e índices GOD de vulnerabilidade local para poços e SEV's; os parâmetros “*G*”, “*O*” e “*D*” se referem ao tipo de ocorrência do aquífero, tipo de litologia da ZNS e profundidade do nível freático ou espessura da ZNS, respectivamente.

DADOS	Parâmetros			Índice GOD
	<i>G</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	
Pt-01	1	0,7	0,7	0,5
Pt-02	1	0,5	0,7	0,4
Pt-03	1	0,6	0,7	0,4
Pt-04	1	0,7	0,7	0,5
Pt-05	1	0,6	0,7	0,4
Pt-06	1	0,6	0,9	0,5
Pt-07	1	0,5	0,8	0,4
Pt-08	1	0,6	0,9	0,5
Pt-09	1	0,6	0,7	0,4
Pt-10	1	0,6	0,8	0,5
Pt-11	1	0,5	0,8	0,4
Pt-12	1	0,7	0,7	0,5
Pt-13	1	0,6	0,7	0,4
Pt-14	1	0,6	0,8	0,4
Pt-15	1	0,6	0,8	0,5
Pt-16	1	0,5	0,7	0,4
Pt-17	1	0,5	0,7	0,4
Pt-18	1	0,7	0,7	0,5
Pt-19	1	0,5	0,7	0,4
Pt-20	1	0,6	0,9	0,5
Pt-21	1	0,5	0,7	0,4
Pt-22	1	0,6	0,7	0,4
Pt-23	1	0,7	0,8	0,6
Pt-24	1	0,6	0,7	0,4
Pt-25	1	0,7	0,8	0,6
Pt-26	1	0,7	0,8	0,6
Pt-27	1	0,5	0,7	0,4
SEV-01	1	0,6	0,8	0,5
SEV-02	1	0,6	0,6	0,4
SEV-03	1	0,5	0,7	0,4
SEV-04	1	0,6	0,8	0,5
SEV-05	1	0,6	0,8	0,4
SEV-06	1	0,7	0,7	0,5
SEV-07	1	0,7	0,9	0,6
SEV-08	1	0,6	0,7	0,4
SEV-09	1	0,6	0,8	0,5
SEV-10	1	0,6	0,8	0,5
SEV-11	1	0,6	0,7	0,4
SEV-12	1	0,5	0,8	0,4
SEV-13	1	0,6	0,8	0,4
SEV-14	1	0,6	0,7	0,4
SEV-15	1	0,7	0,9	0,6
SEV-16	1	0,6	0,8	0,5

A determinação do parâmetro *O* foi realizada com base na composição litológica predominante da ZNS, em conformidade com as informações dos perfis de poços (anexo 1) e modelos das SEV's.

As Figuras 38 a 40 apresentam a disposição na área dos valores associados com cada um dos parâmetros da metodologia GOD, enquanto que a Figura 41 apresenta uma síntese integralizada da análise de vulnerabilidade natural do Aquífero Barreiras. Nos extremos nordeste e sudoeste, têm-se maiores influências do aspecto dimensional da ZNS, conferindo maiores e menores índices de vulnerabilidade, respectivamente.

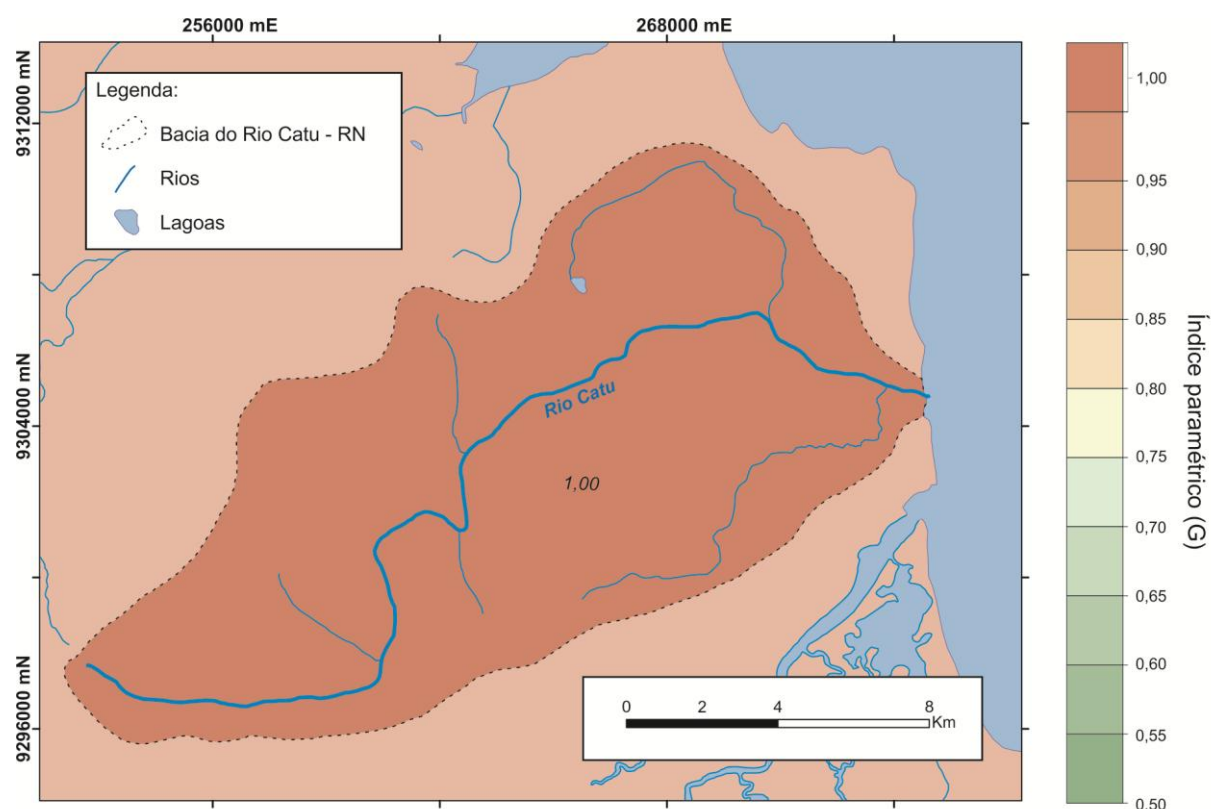


Figura 38: Mapa do índice paramétrico "G" (relacionado ao tipo de ocorrência do aquífero).

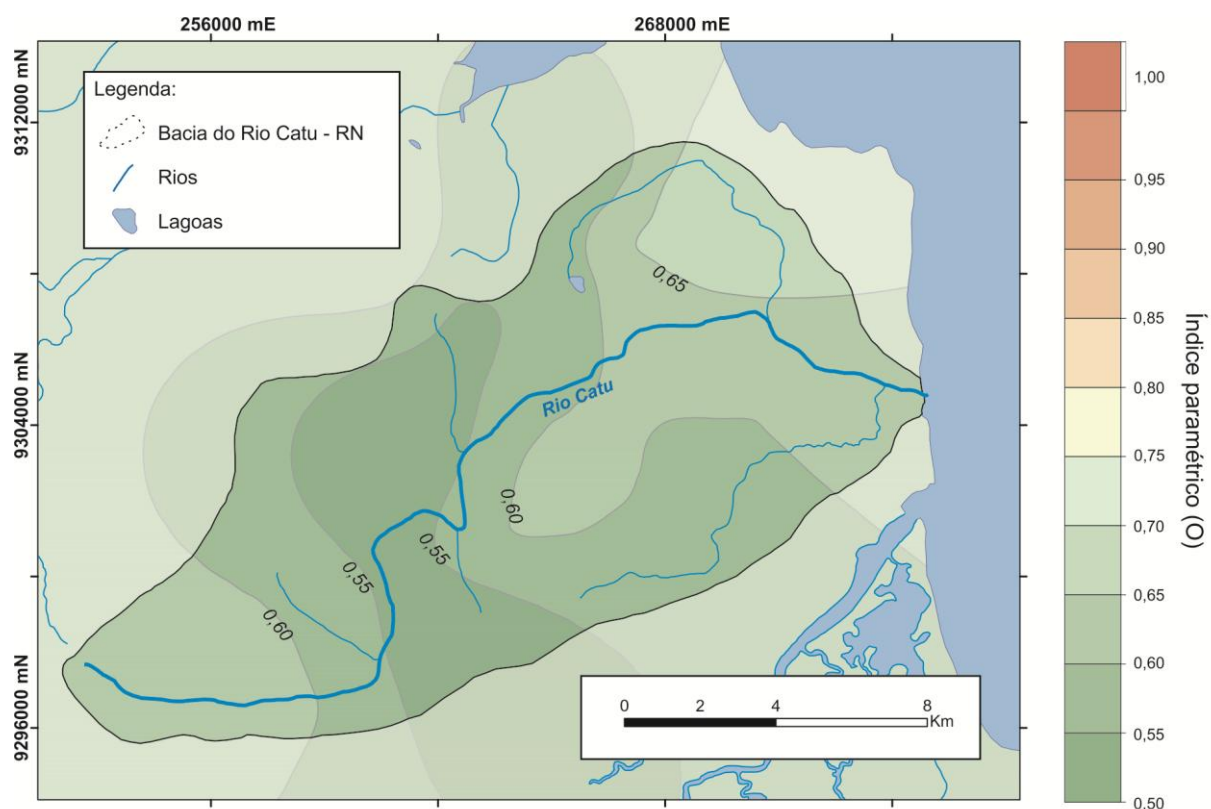


Figura 39: Mapa do índice paramétrico "O" (relacionado à composição litológica da ZNS).

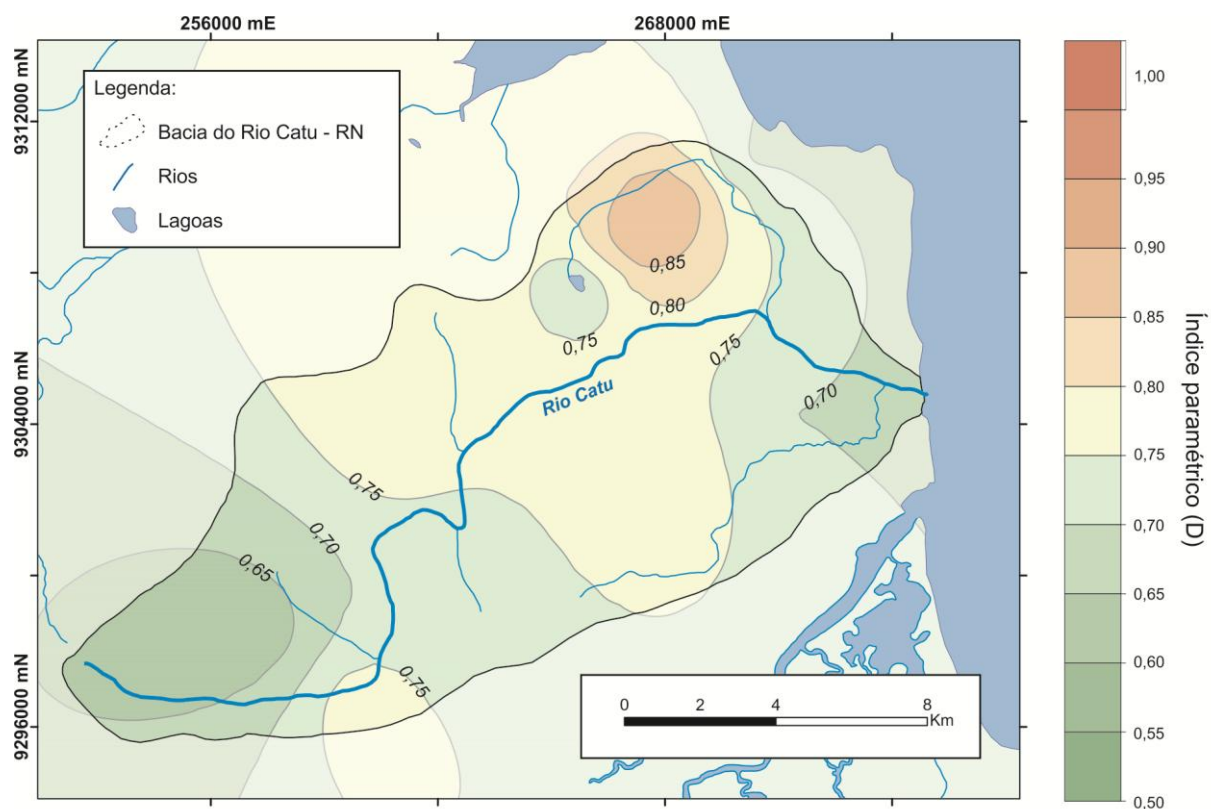


Figura 40: Mapa do índice paramétrico "D" (relacionado à espessura da ZNS).

As observações tomadas com base no levantamento geolétrico (mapa de condutância longitudinal apresentado na Figura 34) são corroboradas com a cartografia referente ao índice de vulnerabilidade GOD (Figura 41). Nesse caso, considerando-se o índice 0,45 como intermediário, distinguem-se áreas mais susceptíveis a contaminação (índice GOD igual ou superior a 0,50) e aquelas com maiores condições de proteção natural (índice GOD menores ou iguais a 0,40). Nesse contexto, a classificação da vulnerabilidade geral para o Aquífero Barreiras na área, definida pela aplicação da metodologia GOD, insere-se nas condições de moderada a alta, sendo aquela subárea de maior risco de contaminação assinalada na porção centro e nordeste (Figura 42).

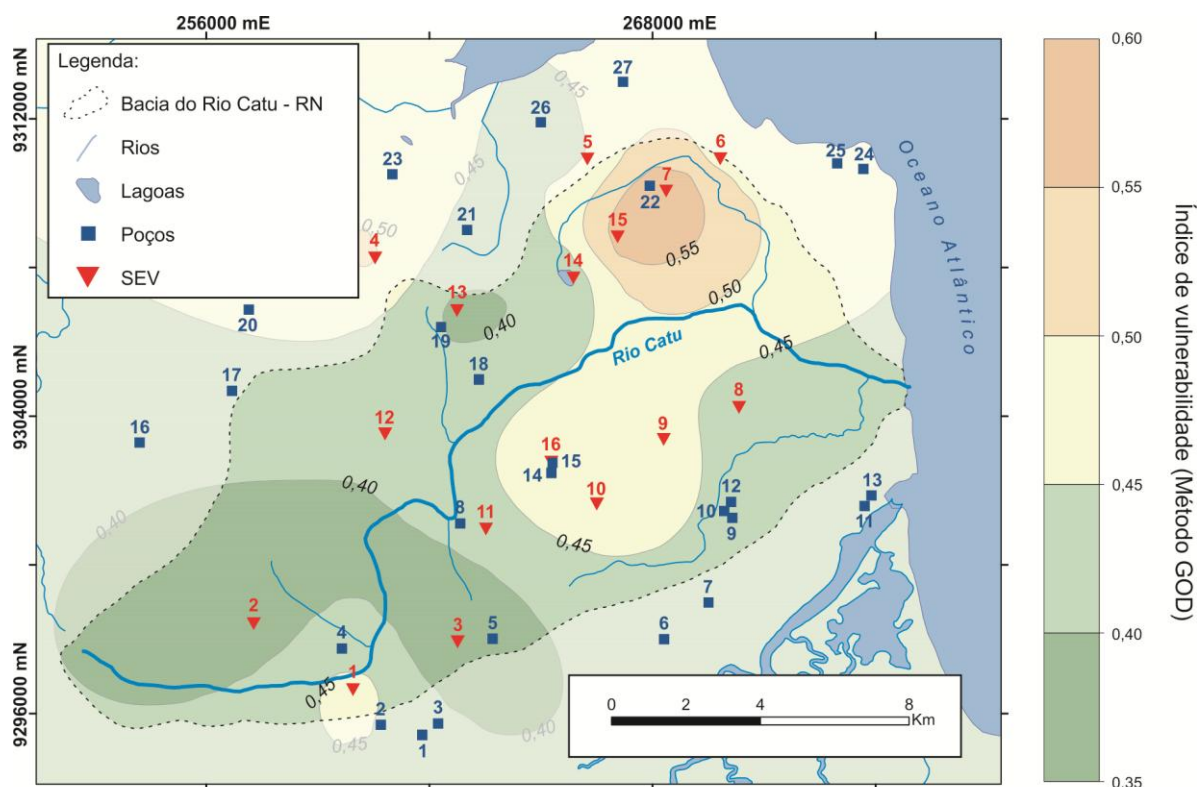


Figura 41: Mapa do índice de vulnerabilidade do Aquífero Barreiras, fundamentado na metodologia GOD (Foster e Hirata, 1993), na área da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN.

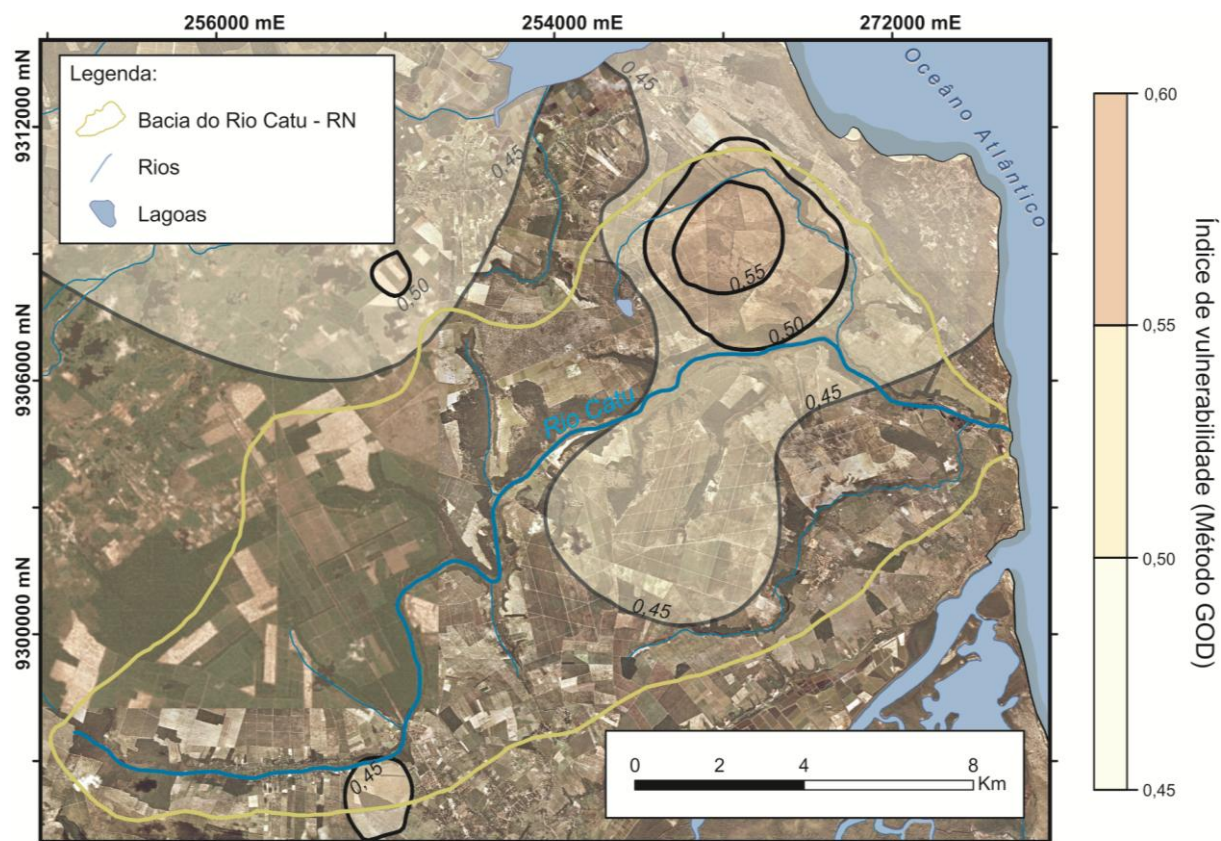


Figura 42: Áreas mais susceptíveis a contaminação antrópica na bacia hidrográfica do Rio Catu – RN, baseado na metodologia GOD (imagem de satélite disponibilizada pela SEMARH-RN).

6.5. Análise conjunta dos mapas de S, vulnerabilidade natural e isoconcentrações de nitrato

Considerando as cartografias de condutância longitudinal (Figura 34) e vulnerabilidade natural (Figura 41), como indicativas de grau de proteção e vulnerabilidade natural do Aquífero Barreiras, respectivamente, foi efetuada uma análise conjunta destes mapas em relação a isoconcentrações de nitrato (NO_3^-) na área (ver Figura 9 na página 24), definidas por Lucena *et al.* (2013a). As maiores concentrações de nitrato na área de estudo encontram-se nas subáreas centrais, nordeste e sudoeste, sendo a primeira corroborada com as baixas taxas de proteção e elevada vulnerabilidade do Aquífero Barreiras nos mapas apresentados. Nesse caso, pode-se considerar que esses teores relativamente elevados e já com indicativos de uma tendência a contaminação do aquífero, provém de excedentes nitrogenados da fertilização química nos perímetros canavieiros. As anomalias de concentração de nitrato situadas nas porções nordeste e sudoeste, por sua vez, devem ser creditadas às condições deficitárias de esgotamento sanitário em adensamentos populacionais locais.

Por outro lado, concentrações relativas elevadas de nitrato verificadas na porção sudoeste da área em estudo, particularmente, representam exceções em termos da presente análise de vulnerabilidade do aquífero, visto que a mesma exibe um alto grau de proteção do aquífero. Esse indício de contaminação, porém, deve estar associado com proteções sanitárias deficientes de alguns poços tubulares antigos localmente verificados, aliado a infiltração de águas servidas nas suas proximidades.

Ressalta-se, adicionalmente, que as anomalias de concentração de nitrato apontadas encontram-se sob influência do fluxo subterrâneo local, conforme potenciometria regional do Aquífero Barreiras exposta no tópico 4.1.1 da presente dissertação. Tal fato corrobora com a ocorrência de pequenos deslocamentos dessas anomalias em relação àquelas zonas de baixa proteção ou elevada vulnerabilidade do aquífero caracterizadas pelos mapas de condutância longitudinal (Figura 34) e vulnerabilidade GOD (Figura 41), respectivamente.

CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente pesquisa, a análise de vulnerabilidade e grau de proteção do Aquífero Barreiras, afora as características intrínsecas nesse sentido do referido manancial, pressupôs uma eventual carga contaminante associada à lixiviação de compostos químicos nitrogenados. Estes últimos decorrem de excedentes de adubação complementar em perímetros cultivados na região, sobretudo a cana-de-açúcar, visto que essa atividade ocupa praticamente toda a extensão da área em análise.

Nesse contexto, o mapa de condutância longitudinal, juntamente com o gráfico elaborado, apresentaram os níveis de proteção que o meio físico propicia para as águas subterrâneas do contexto hidrogeológico local. Assumindo-se o valor intermediário de 20mS, foram definidos subáreas relativamente mais e menos susceptíveis a contaminação, com 10mS e 30mS, respectivamente. O referido gráfico subsidiou a classificação do grau de proteção do Aquífero Barreira, em que os campos delimitados de baixo, intermediário e alto grau de proteção estão em consonância com a configuração do mapa de condutância longitudinal e de calibrações geoeletricas. Em linhas gerais, observou-se a preponderância do parâmetro espessura da zona não saturada em termos de proteção física intrínseca do manancial, apesar de haver casos particulares que esta condição do aquífero é regida pela composição litológica.

Essa análise de grau de proteção do manancial é corroborada pelo mapa referente à metodologia GOD. Ressalta-se que neste último, contudo, as subáreas mais ou menos vulneráveis mostram-se de forma mais contundente quando comparadas com o mapa de condutância longitudinal, decorrente do maior número de amostras consideradas na elaboração dessa cartografia de vulnerabilidade. Nesse aspecto e considerando um índice intermediário de 0,45, as zonas do extremo nordeste e extremo sudoeste da região em estudo são mais e menos susceptíveis a contaminação antrópica imposta na superfície, com índices de vulnerabilidade de 0,50 e 0,40, respectivamente.

Os mapas ora reportados evidenciaram áreas mais susceptíveis a contaminação, as quais podem ser preliminarmente correlacionadas com anomalias de concentração de nitrato, informações estas previamente disponíveis em publicações recentes. As maiores concentrações de nitrato na área central são corroboradas com as baixas taxas de proteção e a elevada vulnerabilidade do Aquífero Barreiras nos mapas apresentados. As anomalias de concentração de nitrato, situadas nas porções nordeste e sudoeste, por sua vez, devem ser

creditadas às condições deficitárias de esgotamento sanitário em adensamentos populacionais locais. Por outro lado, as concentrações relativamente altas, verificadas na porção sudoeste, a qual exibe um alto grau de proteção do aquífero, é uma exceção quanto a esta análise. Esse indício de contaminação, porém, deve estar associado com proteções sanitárias deficientes de alguns poços tubulares antigos localmente verificados, aliado a infiltração de águas servidas nas suas proximidades.

Em linhas gerais e do ponto de vista conceitual, ressalta-se que no presente estudo considerou-se que as terminologias “grau de proteção” e “vulnerabilidade” possuem, respectivamente, conotações provenientes de análises geofísicas e hidrogeológicas, muito embora se tenha utilizado também dados geoeletricos na análise de vulnerabilidade.

Diante da aplicabilidade não invasiva do método geofísico utilizado, bem como das condições limitadas do acesso as áreas para a sua execução, os resultados obtidos mostraram-se capazes de auxiliar uma gestão sustentável da região. Portanto, a presente pesquisa contribui para a implantação de técnicas capazes de subsidiar um gerenciamento hidrogeoambiental sustentável da área da bacia do Rio Catu-RN. Além disso, os resultados conquistados servem como estímulo para a conscientização da preservação do manancial hídrico, o Aquífero Barreiras, por parte das autoridades governamentais gestoras.

REFERÊNCIAS

- Aller, L., Bennett, T., Hackett, G., Lehr, J. H., Petty, R. J. 1987. Drastic: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential hydrogeologic setting. Environmental Protection Agency (EPA), Report 600/2-87-035.
- Angelim, L.A.A., Medeiros, V.C., Nesi, J.R. 2006. Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala. 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERN.
- Bear, J. & Verruit, A. 1987. Modeling groundwater flow and pollutionm. Dorchet: D. Reidel, 144 p.
- Bezerra, F. H. R., Lima Filho, F. P., Amaral, R. F., Caldas, L. H. O., Costa Neto, L. X. 1998. Holocene Coastal Tectonics in NE Brazil. In: Geol. Soc., London, Special Publication. (Org.). Coastal Tectonics. Stewart, I. and Vita-Finzi, C. (eds.). 146ed.Londres: Geological Society, 146:279-293.
- Bezerra, F.H.R. 1998. Neotectonics in Northeastern Brazil. Ph.D. Thesis. University of London, Londres, 208 p.
- Bezerra, F.H.R., Amaro, V.E., Vita-Finzi, C., Saadi, A. 2001. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 14:61-75.
- Bezerra, F.H.R., Rossetti, D.F., Oliveira, R.G., Medeiros, W.E., Brito Neves, B.B., Balsamo, F., Nogueira, F.C.C., Dantas, E.L., Andrades Filho, C., Góes, A.M. 2014. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. Tectonophysics, 614:78-90.
- Bobachev, A.A., Modin, I.N., Shevnin, V.A. 2000. IPI2Win v. 2.1, IPI_RES2, IPI_RES3, User's Guide. Geoscan-M Ltd., Moscou, Rússia, Manual do usuário, 25 p.
- Braga, A.C.O., Filho, W.M., Dourado, J.C. 2006. Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. Revista Brasileira de Geofísica, 24(4)573-581.

-
- Braga, A.C.O. 2008. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(1):61-68
- Braga, A.C.O. & Francisco, R.F. 2014. Natural vulnerability assessment to contamination of unconfined aquifers by longitudinal conductance – (S) Method. *Journal of Geography and Geology*, 6(4):68-79.
- Christakos, G. 2000. *Modern Spatiotemporal Geostatistics*. New York: Oxford Univ. Press, 288 p.
- CPRM, 2010. *Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte*. Recife, 227 p.
- Custódio, E. & Llamas M. R. 1983. *Hidrología subterránea*. Editorial Omega, Barcelona, Vol.1 e 2.
- Debernardi, L., Luca, D.A. Lasagna, M. 2008. Correlation between nitrate concentration in groundwater and parameters affecting aquifer intrinsic vulnerability. *Environmental Geology*, 55:539-558.
- Feitosa, A.C.F., Filho, J.M., Feitosa, E.C., Demetrio, J.G.A. 2008. *Hidrogeologia – conceitos e aplicações*. 3ª edição revista e ampliada. Rio de Janeiro. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Laboratório de Hidrogeologia (LABHID). 812 p.
- Fernandes, L.F.S., Cardoso, L.V.R.Q., Pacheco, F.A.L., Leitão, S., Moura, J.P. 2014. DRASTIC and GOD vulnerability maps of the Cabril River Basin, Portugal. *Civil Engineering, R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 67(2):133-142.
- Fetter, C.W. 1993. *Contaminant Hydrogeology*. University of Wisconsin-Oshkosh, United States of America.
- Foster, S.S.D. & Hirata, R.C.A. 1987. *Groundwater contamination*. Lima: WHO/PAHO/HPE/CEPI.
- Foster, S.S.D. & Hirata, R.C.A. 1988. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. WHO-PAHO/HPE-CEPIS, Technical Manual, Lima, 81p.
-

-
- Foster, S.S.D. & Hirata, R.C.A. 1993. Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Geológico, 67-92.
- Foster, S.S.D., Hirata, R.C.A., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. 2006. Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Groundwater Management Advisory Team, WHO/PAHO/CEPIS and UNESCO/ROSTLAC/PHI, The World Bank, Washington, D.C., 103 p.
- Henriet, J. P. 1976. Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. *Geophysical Prospecting*, 24:344-353.
- IPT. 1982. Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. Secretaria de Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Norte, Relatório técnico IPT nº 15.795, Natal, 389 p.
- Kalinski, R.J., Kelly, W.E., Bogardi, I., Pesti, G. 1993. Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers. *Journal of Applied Geophysics*, 30:161-173.
- Kemerich, P.D.C., Martins, S. R., Kobiyama, M., Silveira, R. L., Descovi Filho, L., Rizzardi, A. S., Borba, W. F. 2011. Vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim: uso da metodologia GOD. *Engenharia Ambiental*, 10:189-207.
- Kirsch, R. 2009. *Groundwater Geophysics: A tool for Hydrogeology*. Ed. Springer, Germany, 548 p.
- Koefoed, O. 1979. *Geosounding Principles, 1: Resistivity Souding Measurements*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York. 273 p.
- Lobo Ferreira, J.P. & Oliveira, Manuel M. 2004. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. *Geofísica Internacional*, 43(4)541-550.
-

-
- Loureiro, G.E. & Lisboa, E.G. 2011. Comparação dos métodos de interpolação especial aplicados a dados pluviométricos da região hidrográfica Tocantins-Araguaia. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais.
- Lucena, L.R.F. 2005. Implicação da compartimentação estrutural no Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Pirangi-RN. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 151 p.
- Lucena, L.R.F., Dantas, J.A., Medeiros, A.A., Rosa Filho, E.F. 2013(a). A lixiviação de fertilizantes nitrogenados na zona não saturada superior do Aquífero Barreiras – área da bacia do Rio Catu – RN. *Revista Águas Subterrâneas*, Natal, 27(1)79-91.
- Lucena, L.R.F, Oliveira JR., J.G., Medeiros, W.E., Queiroz, M.A. 2013(b). The potential of the Barreiras Aquifer in the lower course of the Doce River, Rio Grande do Norte, northeast Brazil – Integration of hydrogeological and geophysical data. *Revista Brasileira de Geofísica*, Natal, 31(1)43-57.
- Martinelli, L. A. 2007. Os caminhos do nitrogênio - do fertilizante ao poluente, *Informações agronômicas*, número 118, junho de 2007.
- Martinez-Bastida, J.J., Arauzo, M., Valladolid, M. 2010. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal*, 18:681-698.
- Melo, J.G., Rebouças, A.C., Queiroz, M.A. 1994. Análise dos componentes hidrogeológicos da área de Natal – RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, VIII. Anais. Recife, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 471-480.
- Melo, J. G. 1995. Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal / RN. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, 196 p.
- Mendoza, J.A. & Barmen, G. 2006. Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. *Environmental Geology*, 50:569-580.
-

-
- Nogueira, A.M.B. 1982. O Cenozóico continental da região de Natal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Nogueira, F.C.C., Bezerra, F.H.R., Castro, D.L. 2006. Deformação rúptil em depósitos da Formação Barreiras na porção leste da Bacia Potiguar. *Revista do Instituto de Geociências – USP, São Paulo*, 6(2)51-59.
- Orellana, E.1972. *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*. Ed. Paraninfo. Madrid. 523 p.
- Pavão, A.D.M. 2004. Avaliação do índice de vulnerabilidade na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria-RS. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria (UFRM), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), 121 p.
- Reynolds, J.M. 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Ed. Wiley. England.796 p.
- Rodrigues, M.A.C., Lucena, L.R.F., Souza, I.V.F. 2011. Preliminary geometric model of the Barreiras Aquifer derived from hydrogeophysics data at the River Catu basin, NE Brazil. In: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. *Anais. Rio de Janeiro, RJ*.
- Rossetti, D.F., Bezerra, F.H.R., Góes, A.M., Valeriano, M.M., Andrades-Filho, C.O., Mittani, J.C.R., Tatumi, S.H. & Brito-Neves, B.B. 2011. Late Quaternary sedimentation in the Paraíba Basin, Northeastern Brazil: Landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 300:191-204.
- SERHID. 1998. Plano Estadual de Recursos Hídricos – Relatório Síntese. Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Natal, 254 p. Disponível em: <http://www.semarh.rn.gov.br/>. Acessado em 10 de janeiro de 2015.
- Silva, L.R.D., Lucena, L.R.F., Vieira, M.M., Nascimento, A.F. 2014. Estimativa de parâmetros hidráulicos do Aquífero Barreiras-RN a partir de análise computacional de imagens de lamina delgadas. *Revista Águas Subterrâneas, Natal*, 28(2):14-27.
- Souza, I.V.F., Lucena, L.R.F., Monteiro, A.R.O., Cavalcante, D.C.L. 2013. Characterization of subsurface fault in Barreiras Aquifer Formation from geoelectrical and
-

hydrogeological data – area of River Catu basin, NE Brazil. In: 13TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. Anais. Rio de Janeiro, RJ.

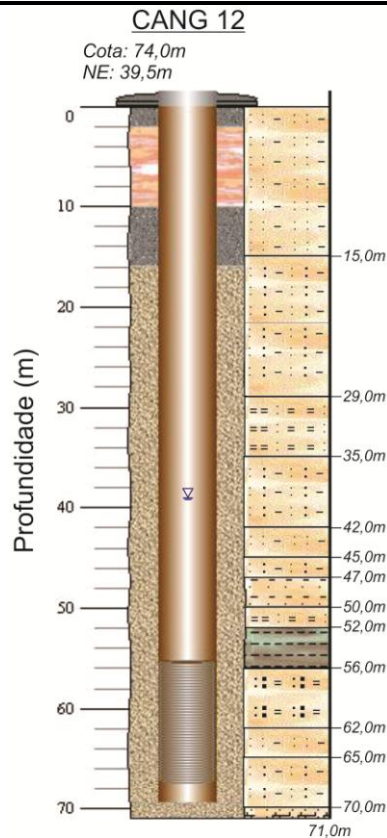
SURFER. 2002. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. Golden Software, Inc. Golden, Colorado, USA. 664p. <http://www.goldensoftware.com>

Tucci, C.E.M. 1993. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre, Editora da UFRGS, ABRH, 943 p.

UNESCO. 2015. Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos – água para um mundo sustentável. World Water Assessment Programme, UNESCO. 8p. <http://www.unesco.org> (acessado em 20/03/2015)

Vrba, J. & Zaporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists – International Contributions to Hydrology, 16 p.

ANEXO – PERFIS DE POÇOS TUBULARES UTILIZADOS

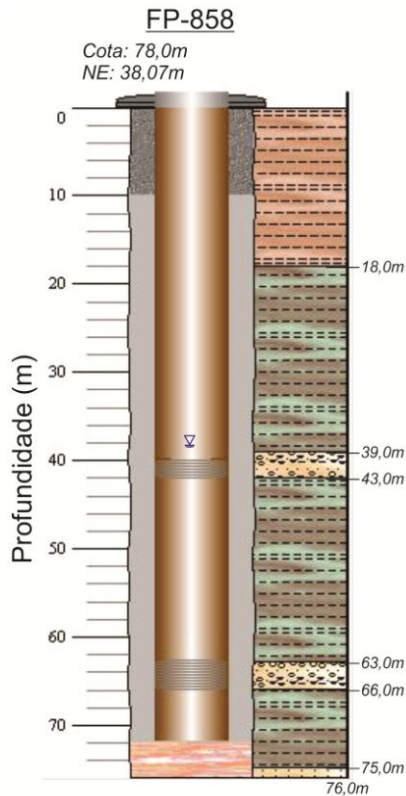


De (m)	Até (m)	Litologia
0,0	15,0	Arenito fino argiloso
15,0	29,0	Arenito fino a médio argiloso
29,0	35,0	Argilito arenoso
35,0	42,0	Arenito fino a médio argiloso
42,0	45,0	Arenito fino argiloso
45,0	47,0	Arenito fino a médio argiloso
47,0	50,0	Arenito argiloso
50,0	52,0	Argilito arenoso
52,0	56,0	Argilito
56,0	62,0	Arenito médio a grosso argiloso
62,0	65,0	Arenito fino argiloso
65,0	70,0	Arenito fino a médio argiloso
70,0	71,0	Arenito calcífero

Dados construtivos do poço:

- Tubo de revestimento
- Filtro
- Cimentação
- Material da formação
- Pré-filtro

Pt – 01

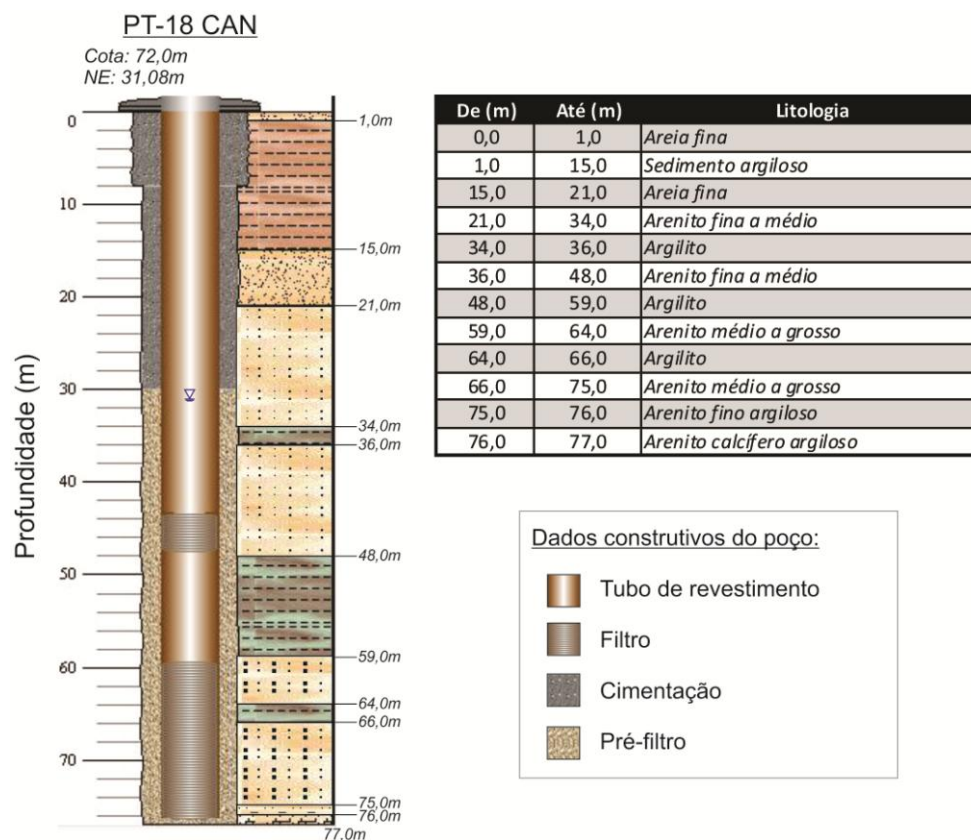


De (m)	Até (m)	Litologia
0,0	18,0	Sedimentos argilosos
18,0	39,0	Argilito
39,0	43,0	Arenito com seixos quartzosos
43,0	63,0	Argilito
63,0	66,0	Arenito com seixos quartzosos
66,0	75,0	Argilito
75,0	76,0	Arenito calcífero

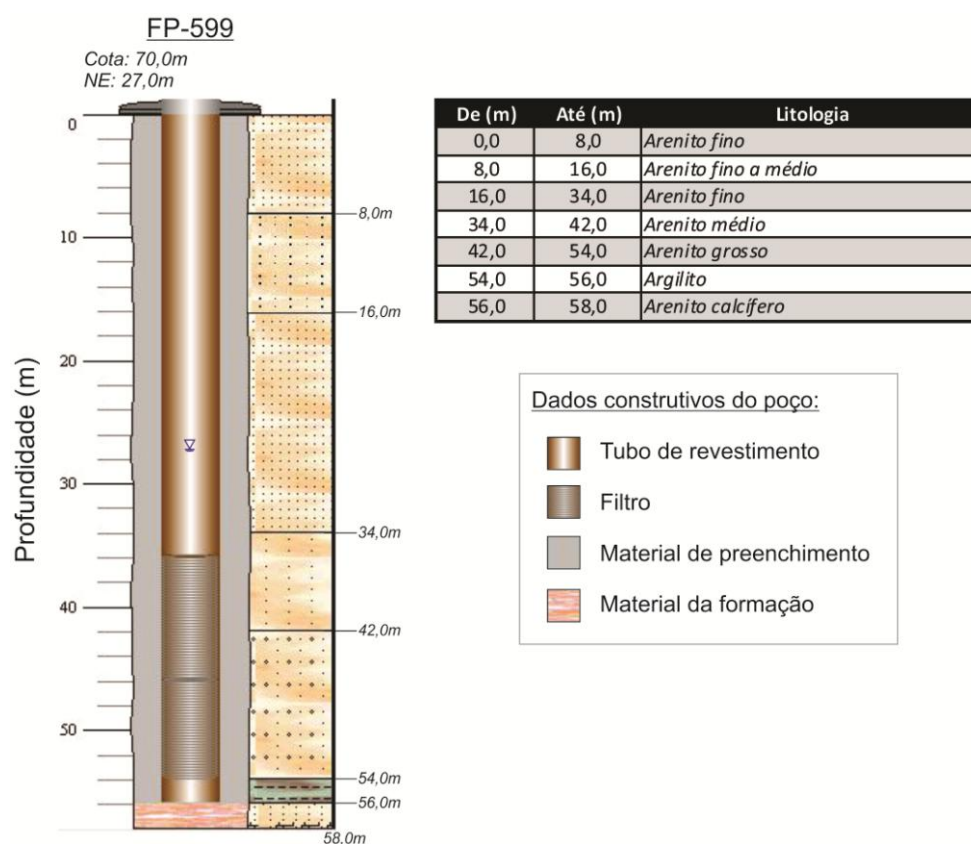
Dados construtivos do poço:

- Tubo de revestimento
- Filtro
- Cimentação
- Material de preenchimento
- Material da formação

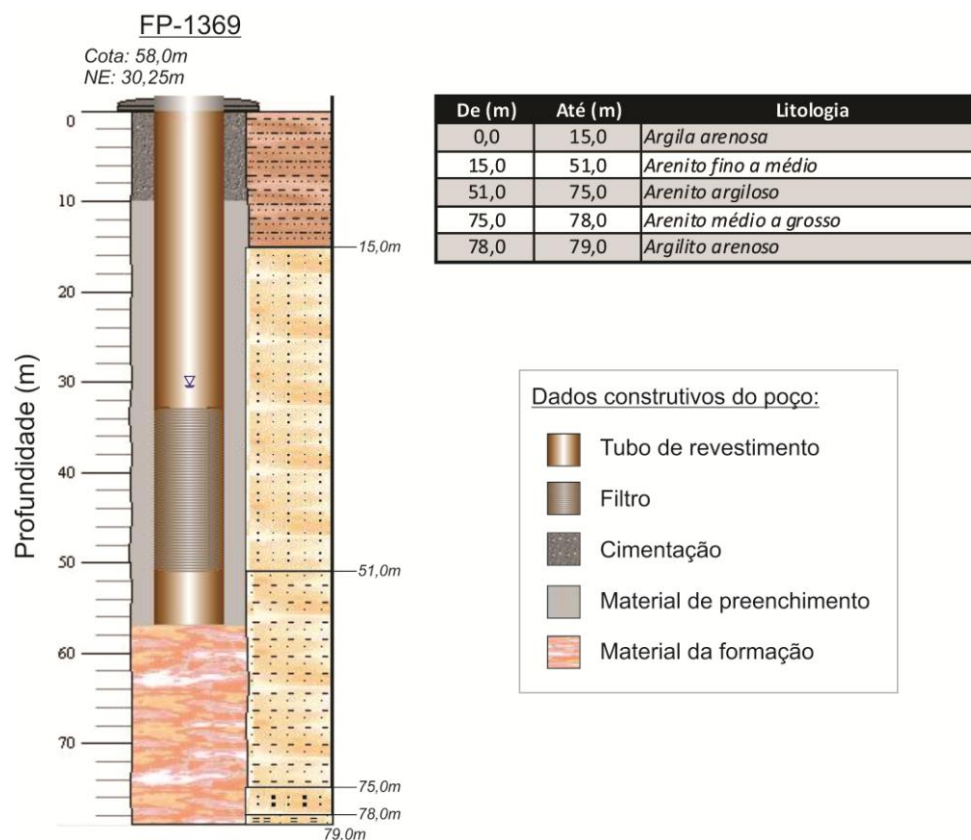
Pt – 02



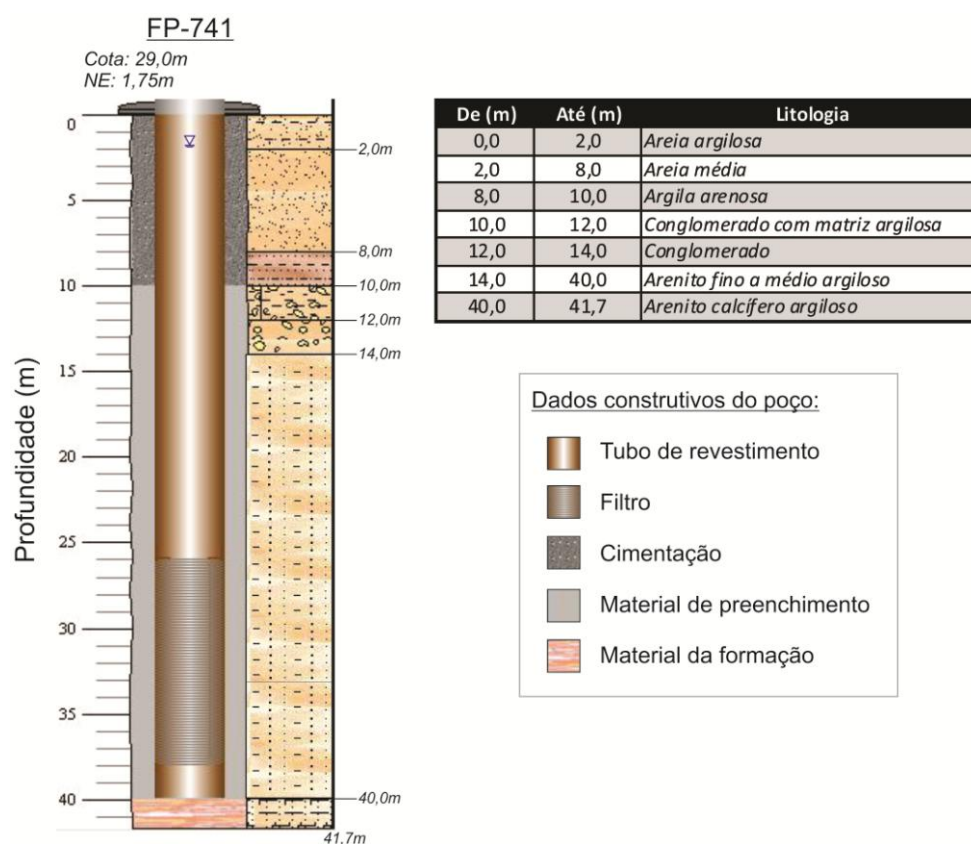
Pt – 03



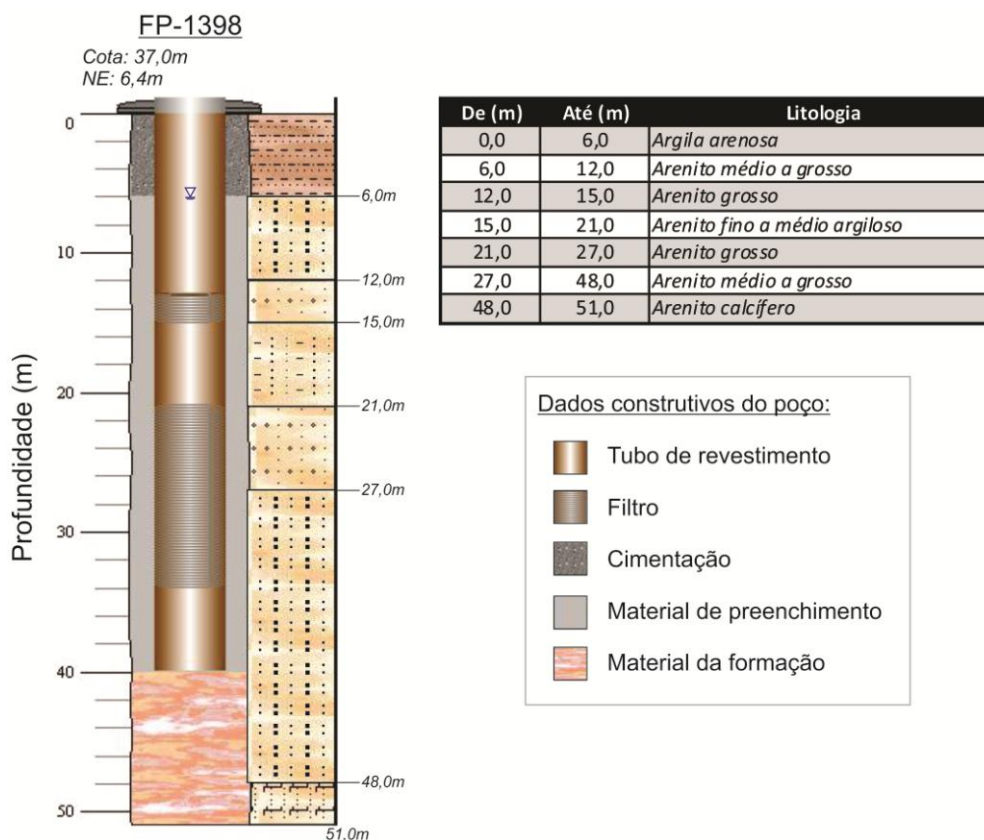
Pt – 04



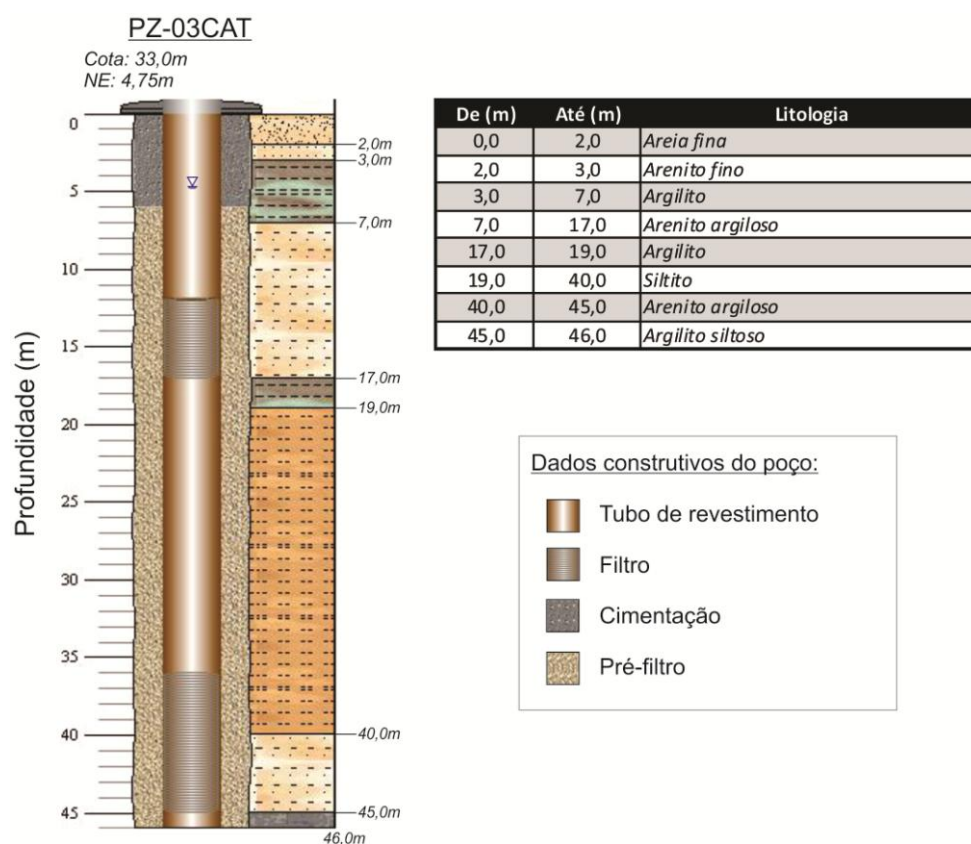
Pt – 05



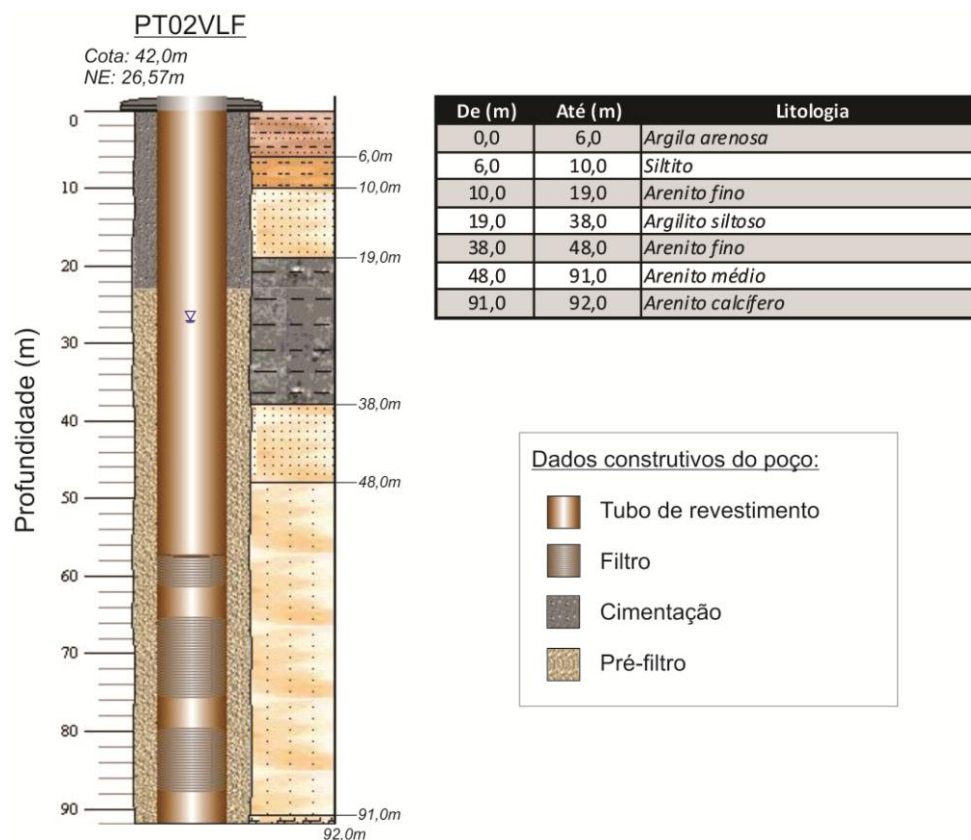
Pt – 06



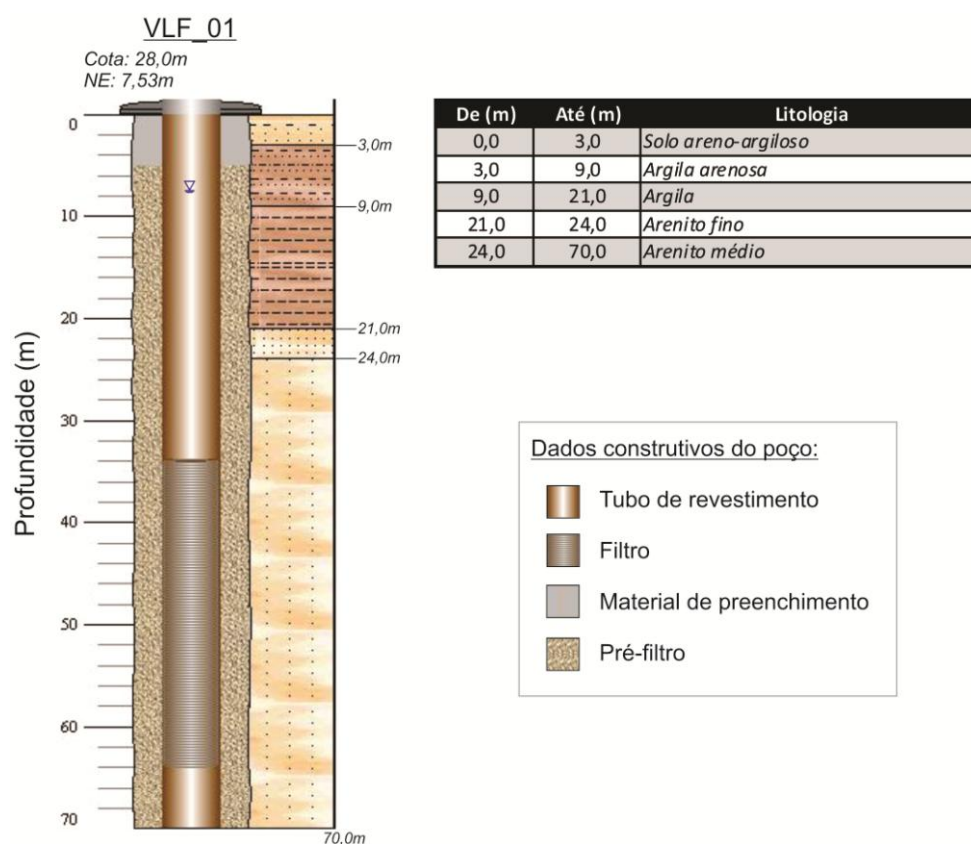
Pt – 07



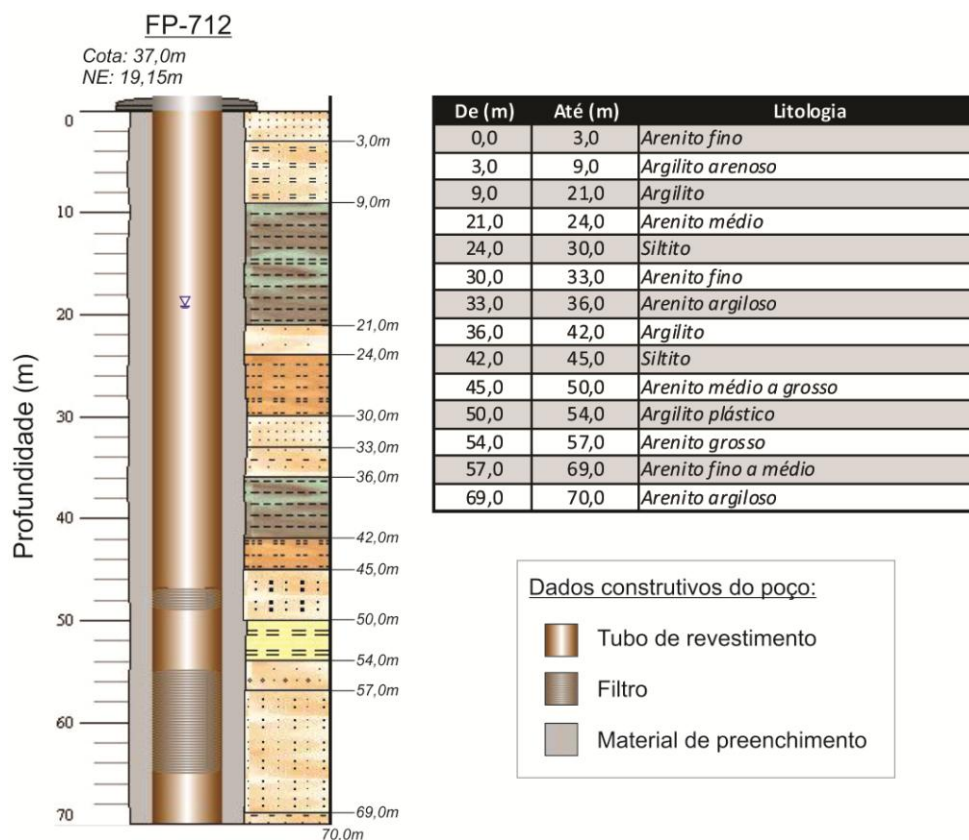
Pt – 08



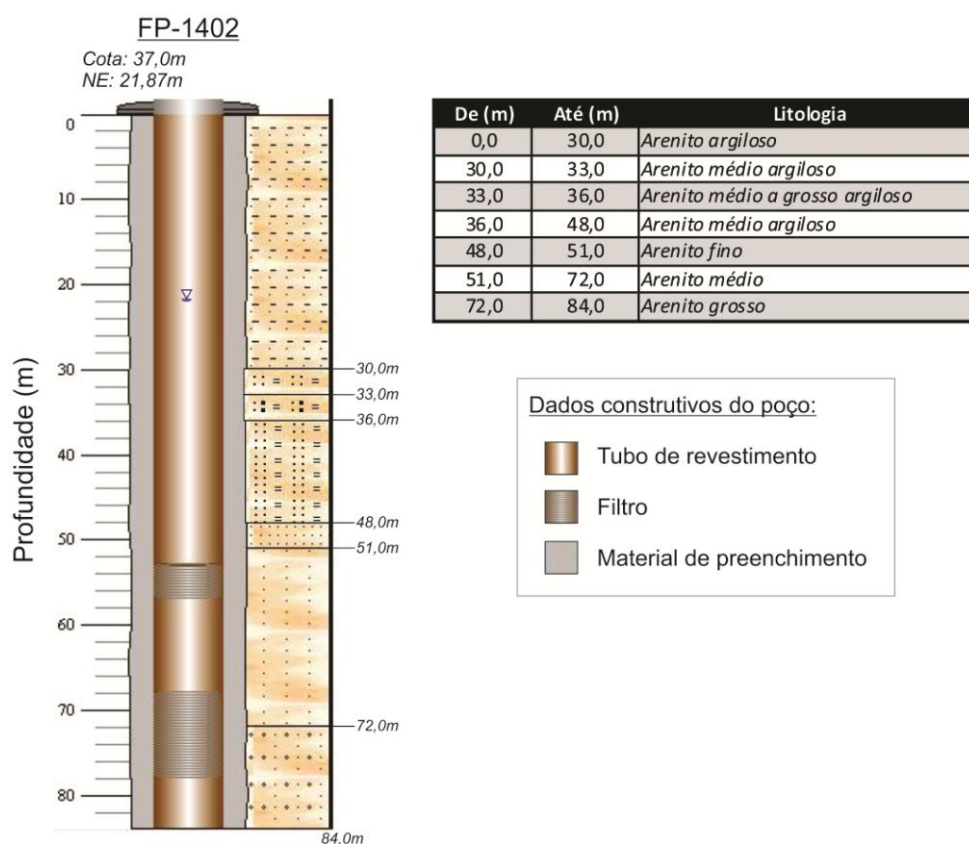
Pt – 09



Pt – 10



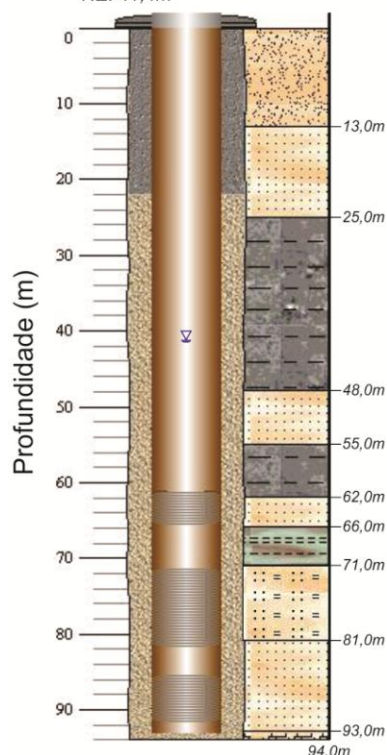
Pt – 11



Pt – 12





CANG BAR 05

Cota: 46,0m
NE: 41,4m



De (m)	Até (m)	Litologia
0,0	13,0	Areia fina
13,0	25,0	Arenito fino
25,0	48,0	Argilito siltoso
48,0	55,0	Arenito fino
55,0	62,0	Argilito siltoso
62,0	66,0	Arenito fino
66,0	71,0	Argilito
71,0	81,0	Arenito médio argiloso
81,0	93,0	Arenito fino
93,0	94,0	Arenito calcífero argiloso

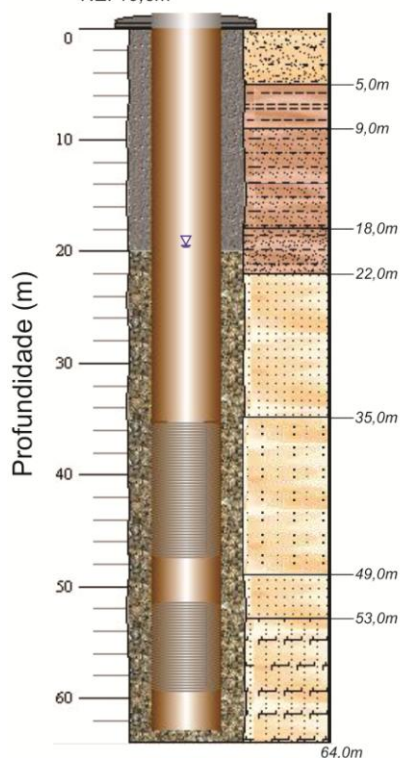
Dados construtivos do poço:

-  Tubo de revestimento
-  Filtro
-  Cimentação
-  Pré-filtro

Pt – 13





PT-65 CAT

Cota: 47,0m
NE: 19,5m

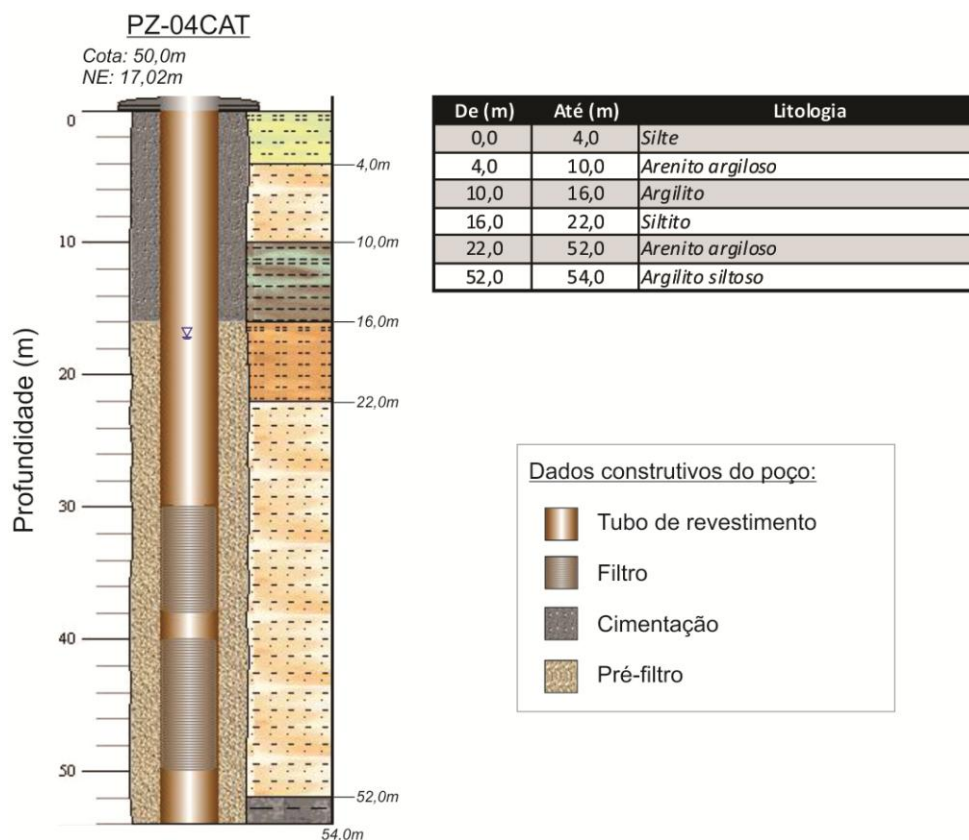


De (m)	Até (m)	Litologia
0,0	5,0	Areia siltosa
5,0	9,0	Argila
9,0	18,0	Argila siltosa
18,0	22,0	Argila areno-siltosa
22,0	35,0	Arenito fino
35,0	49,0	Arenito fino a médio
49,0	53,0	Arenito fino
53,0	64,0	Arenito calcífero

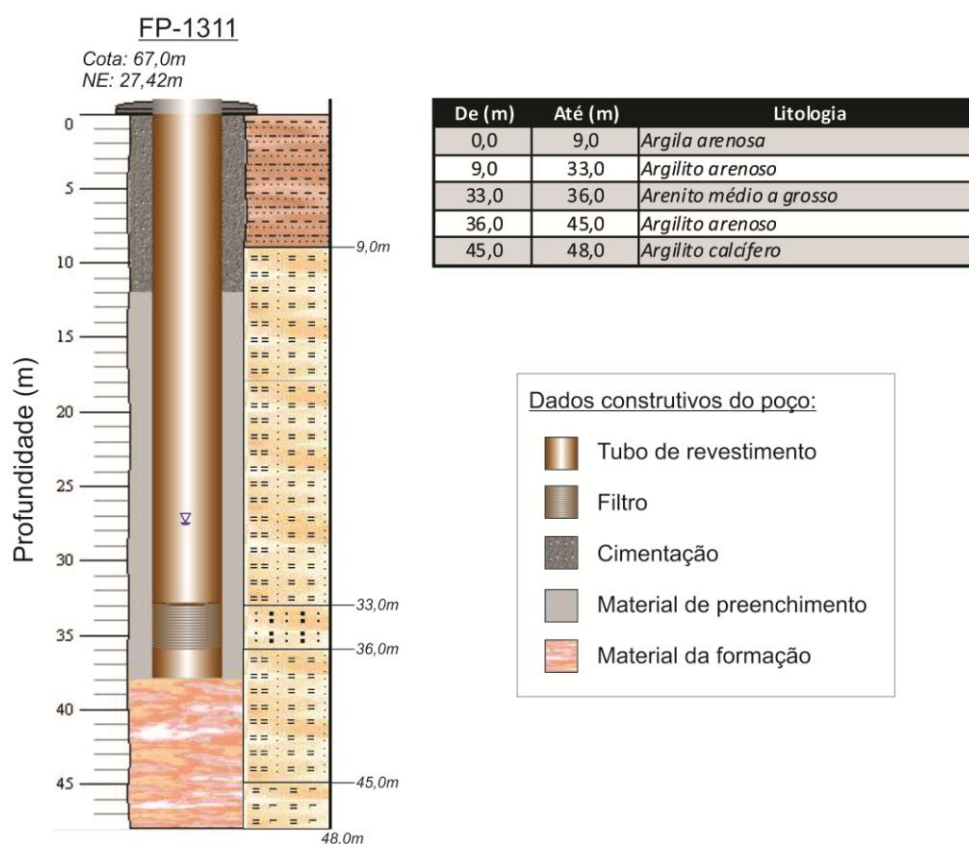
Dados construtivos do poço:

-  Tubo de revestimento
-  Filtro
-  Cimentação
-  Cascaho

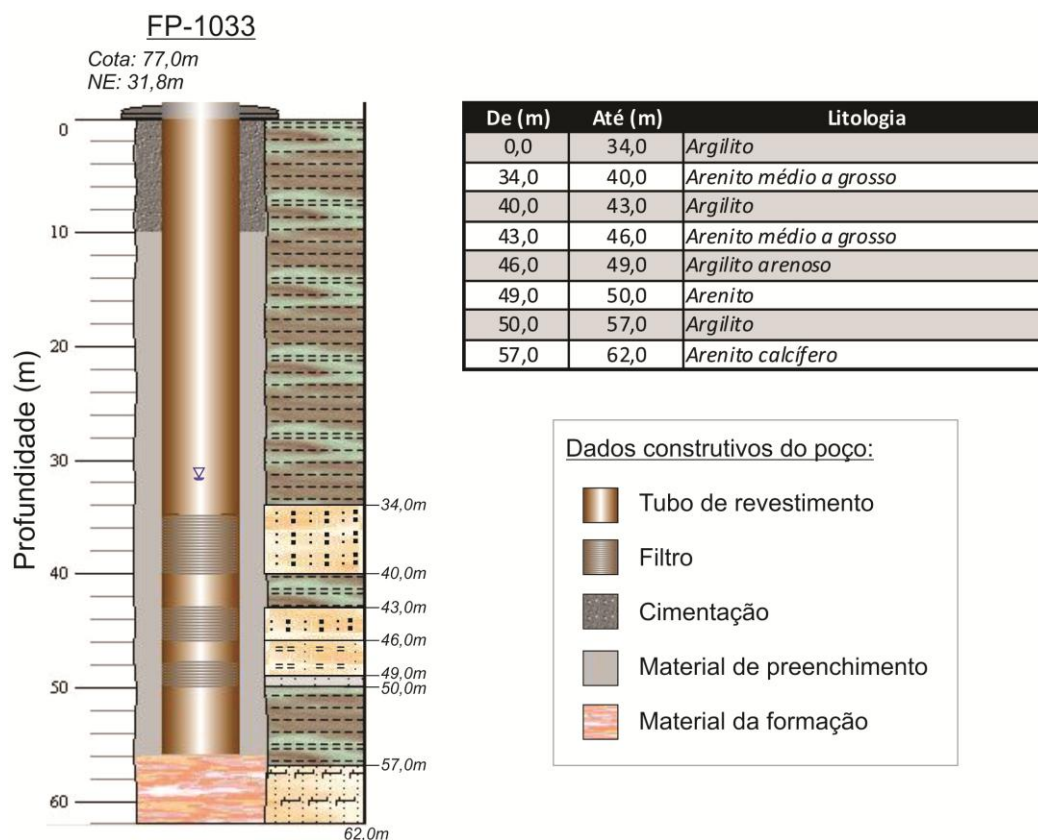
Pt – 14



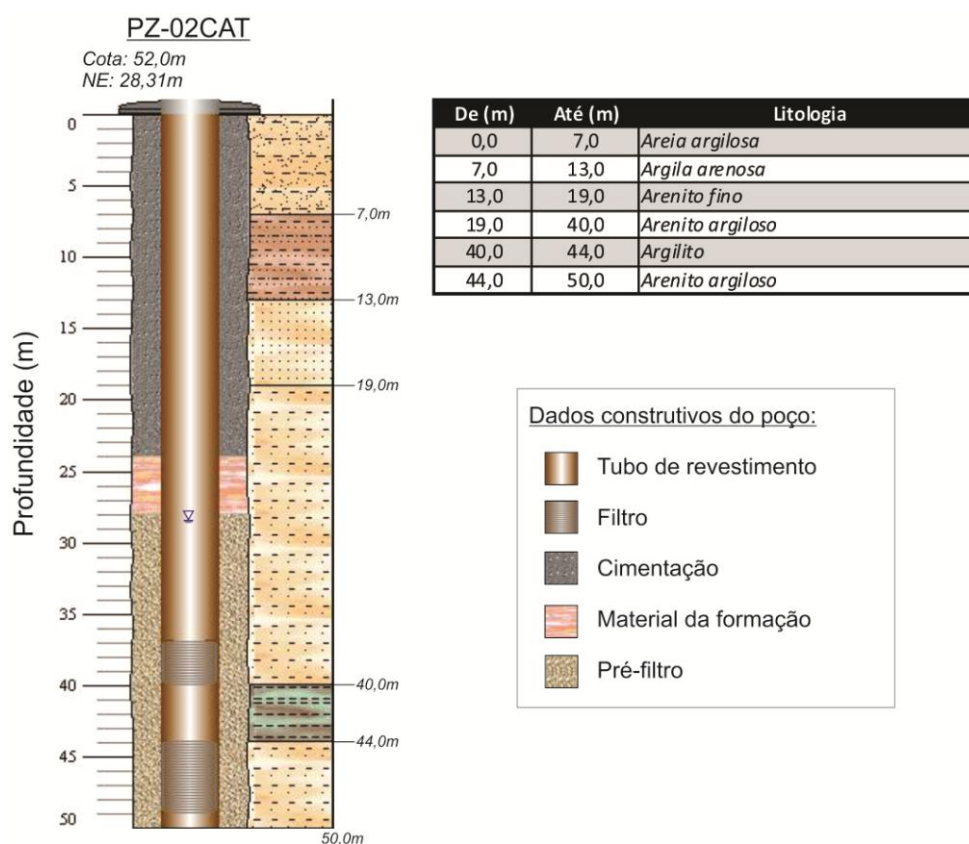
Pt – 15



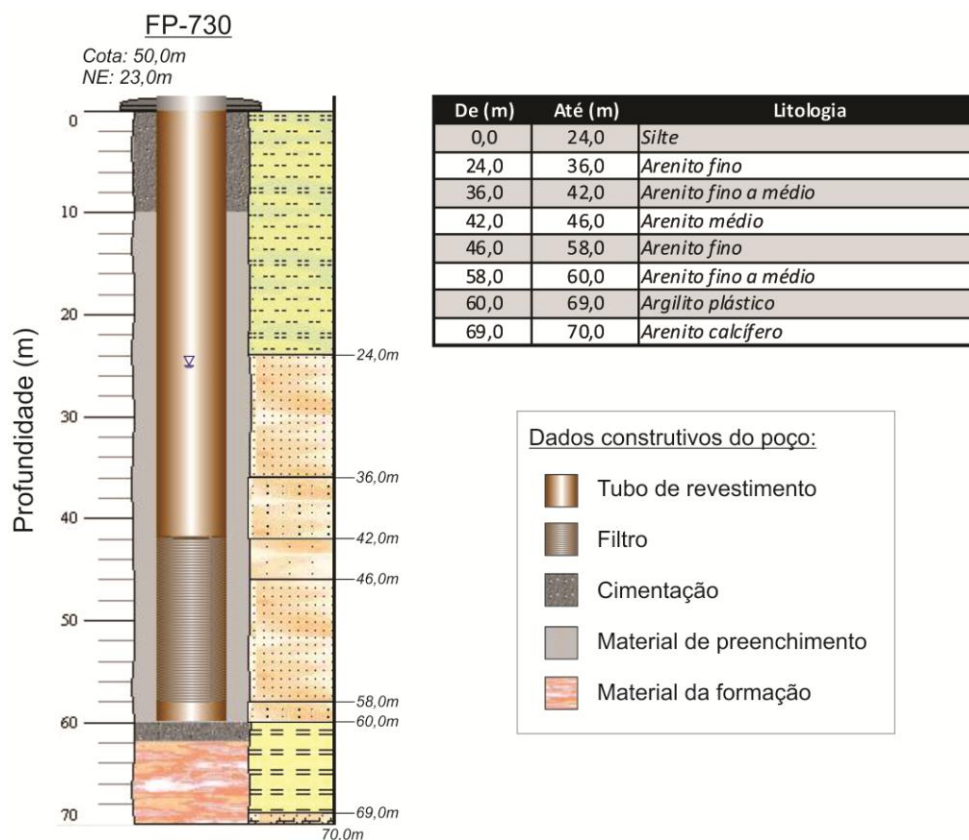
Pt – 16



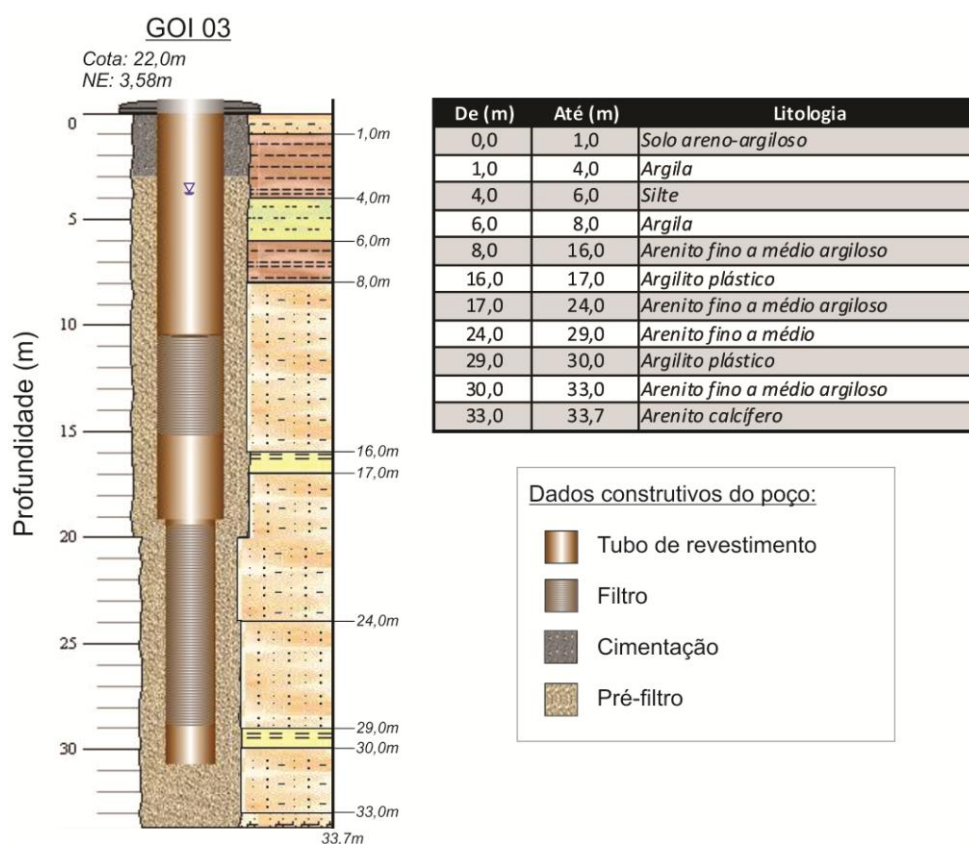
Pt – 17



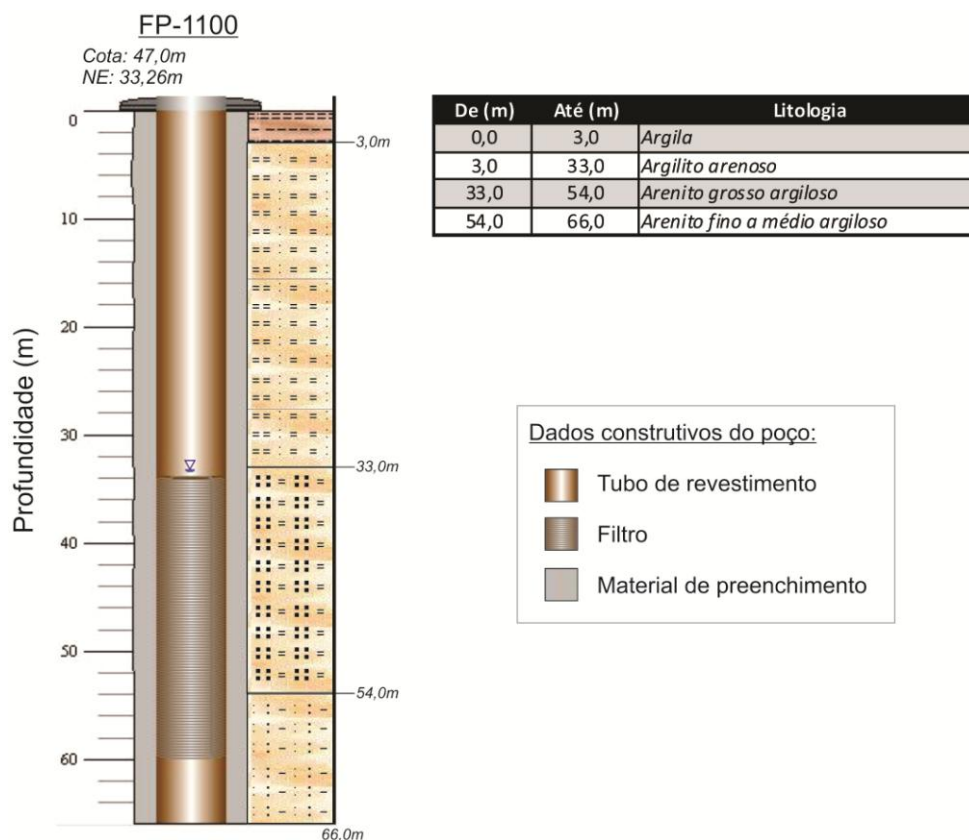
Pt – 18



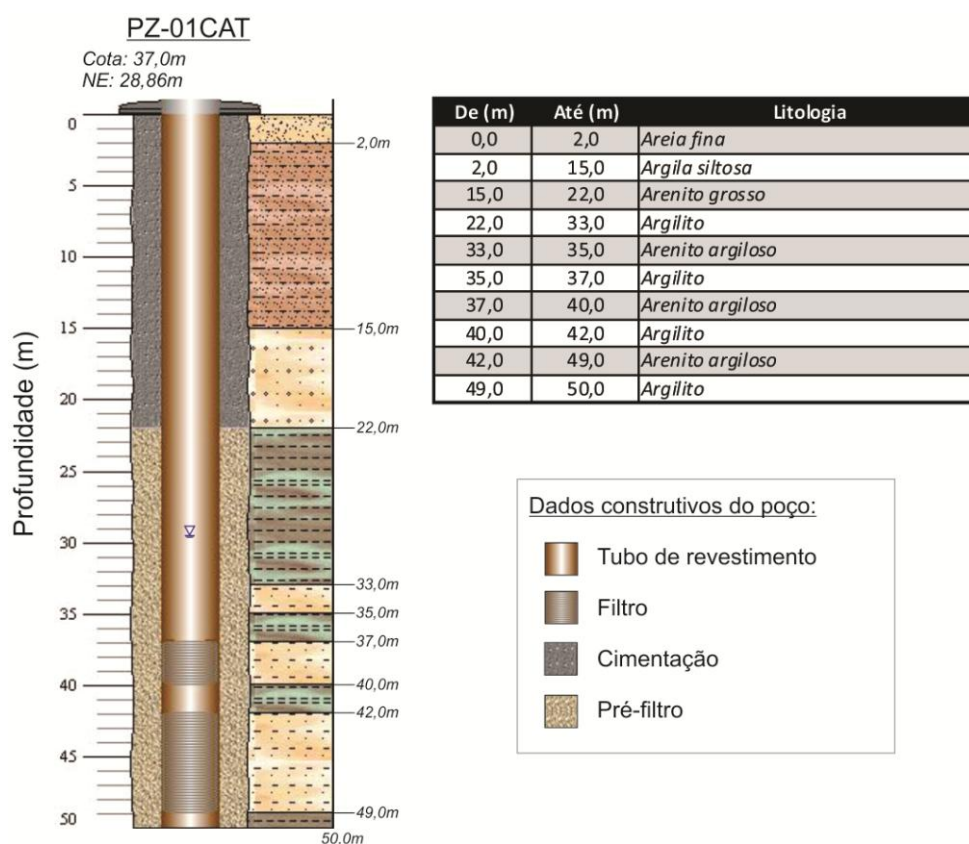
Pt – 19



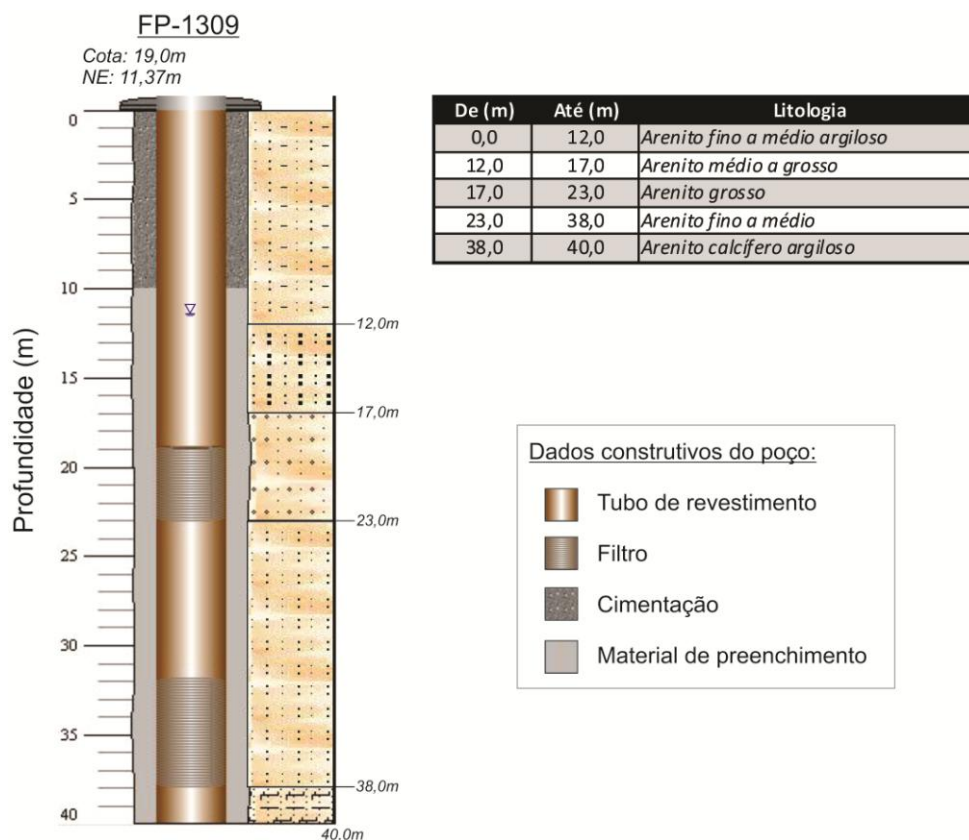
Pt – 20



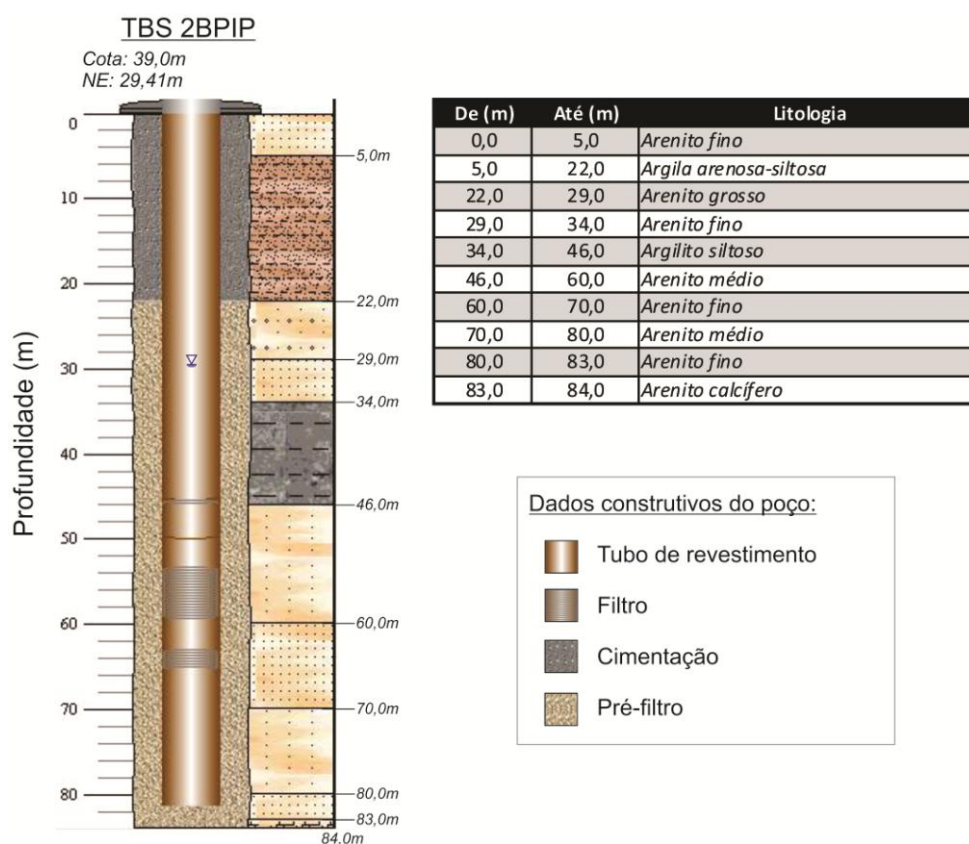
Pt – 21



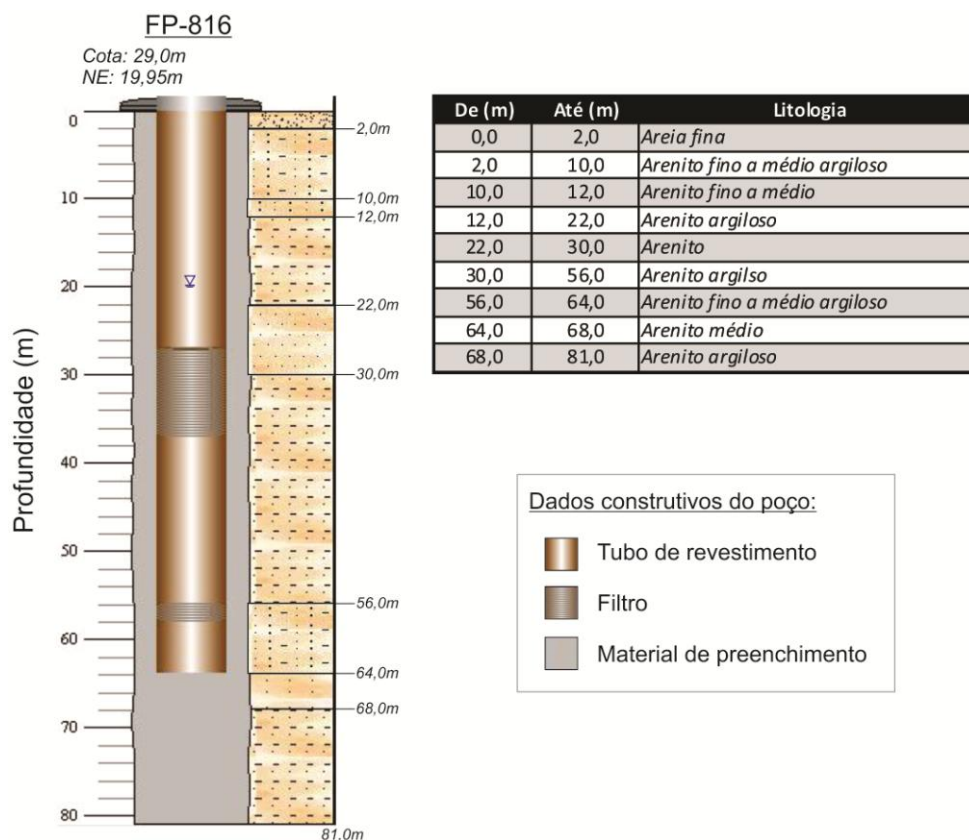
Pt – 22



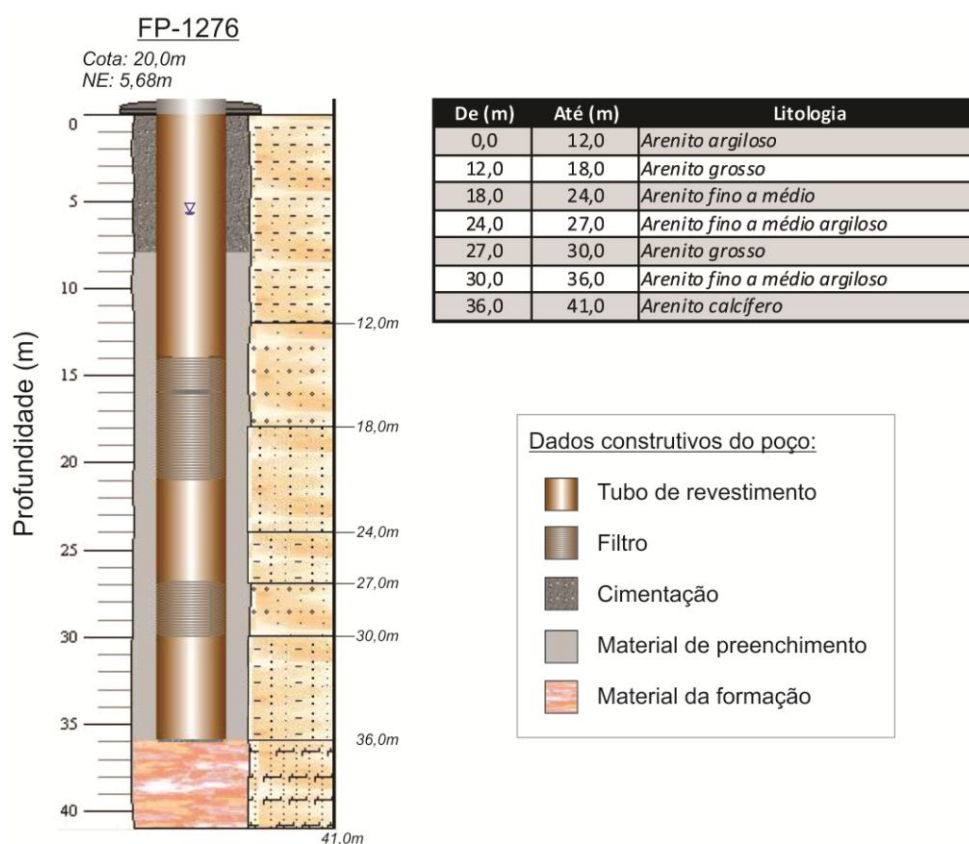
Pt – 23



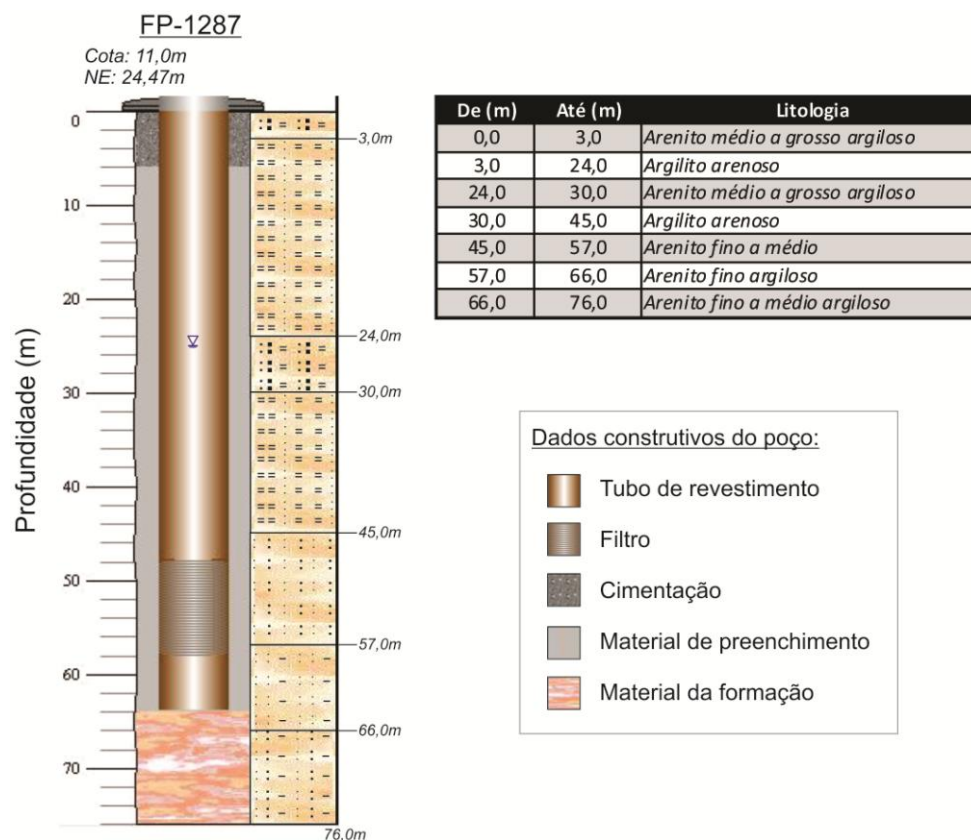
Pt – 24



Pt – 25



Pt – 26



Pt – 27

**APÊNDICE – MANUSCRITO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO
EM PERIÓDICO INDEXADO**

**CONTRIBUTION OF HYDROGEOPHYSICAL DATA FOR THE
ASSESSMENT OF UNCONFINED AQUIFER PROTECTION LEVELS -
AN EXAMPLE FROM THE NORTHEAST OF BRAZIL**

Alexandre R. O. Monteiro⁽¹⁾, Leandson R. F. Lucena⁽¹⁾⁽²⁾

(1) Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica

(2) Departamento de Geofísica

Centro de Ciências Exatas e da Terra

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

59.078-970, Natal – RN, Brasil

E-mails: alexandrerichardson21@gmail.com leandson@geofisica.ufrn.br

Abstract

The use of chemical fertilization in arable perimeters provides increased productivity, though it can eventually lead to a qualitative depreciation of groundwater sources, especially if such sources are unconfined in nature. In this context, this paper presents results from an analysis of the level of natural protection of the Barreiras Aquifer in an area located on the east coast of the State of Rio Grande do Norte-Brazil. Such an aquifer is clastic in nature and is of an unconfined hydraulic character, which clearly makes it susceptible to contamination from surface ground loads with contaminants associated with the leaching of excess fertilizers not absorbed by ground vegetation. The methodology used was based on the use of hydrogeophysical data, particularly of inverse models of vertical electrical soundings (VES) and information from well profiles, allowing the acquisition of longitudinal conductance cartographies (S), data in mili-Siemens (mS), and vulnerability of the aquifer. Such cartographies were prepared with emphasis to the unsaturated overlying zone, highlighting in particular its thickness and occurrence of clay lithologies. Thus, the longitudinal conductance cartography and vulnerability revealed areas more susceptible to contamination in the Northeast and East-Central sections of the study area, with values equal to or less than 10mS and greater than or equal to 0,50, respectively. On the other hand, the Southwest section proved to be less susceptible to contamination with longitudinal conductance values and vulnerability indices greater than or equal to 30mS and less than or equal to 0,40, respectively.

Key words

Hydrogeophysics; longitudinal conductance; vulnerability; Barreiras Aquifer-RN State/Brazil.

Introduction and objectives

Among the extensive literature available, there are reports on the influence of use of agrochemicals concerning the qualitative degradation of groundwater sources, especially of fertilizers (Fetter 1993; Custódio and Llamas 1983). Not infrequently, agricultural perimeters require large amounts of water for irrigation, as well as substantial quantities of chemical fertilization, including nitrogen compounds. Chemical surpluses from these compounds in their oxidized form (nitrate) - not assimilated by vegetation coverage - can eventually reach aquiferous zones, especially the free surface of water in unconfined aquifers. Thus, the *fertilization and irrigation* set plays an important role in agricultural productivity, enabling

economic development of a particular region, although its intensive, and at random, practice can cause environmental problems related to groundwater quality. Generally speaking, we have the importance of fertilization in terms of productivity, however, with an increased risk of contamination of groundwater sources (Lucena et al. 2013a).

Based on the assumption of a hydrostratigraphy of unconfined aquifers, we can evaluate that the context involving the irrigated agriculture as a threat to groundwater features three environmental situations (fig.1), considering the same amount of water for irrigation and chemical fertilizer, according to different soil characteristics overlaying the aquifer:

- (A) Vadose zone relatively thin without clay compounds that may slow contaminant percolation, providing low level of protection;
- (B) Vadose zone with predominantly sandy composition, similar to the previous, however thicker, providing higher level of protection than that reported in “A”;
- (C) Vadose zone with clay compounds interspersed, which are able to slow the advance of leachate contaminants.

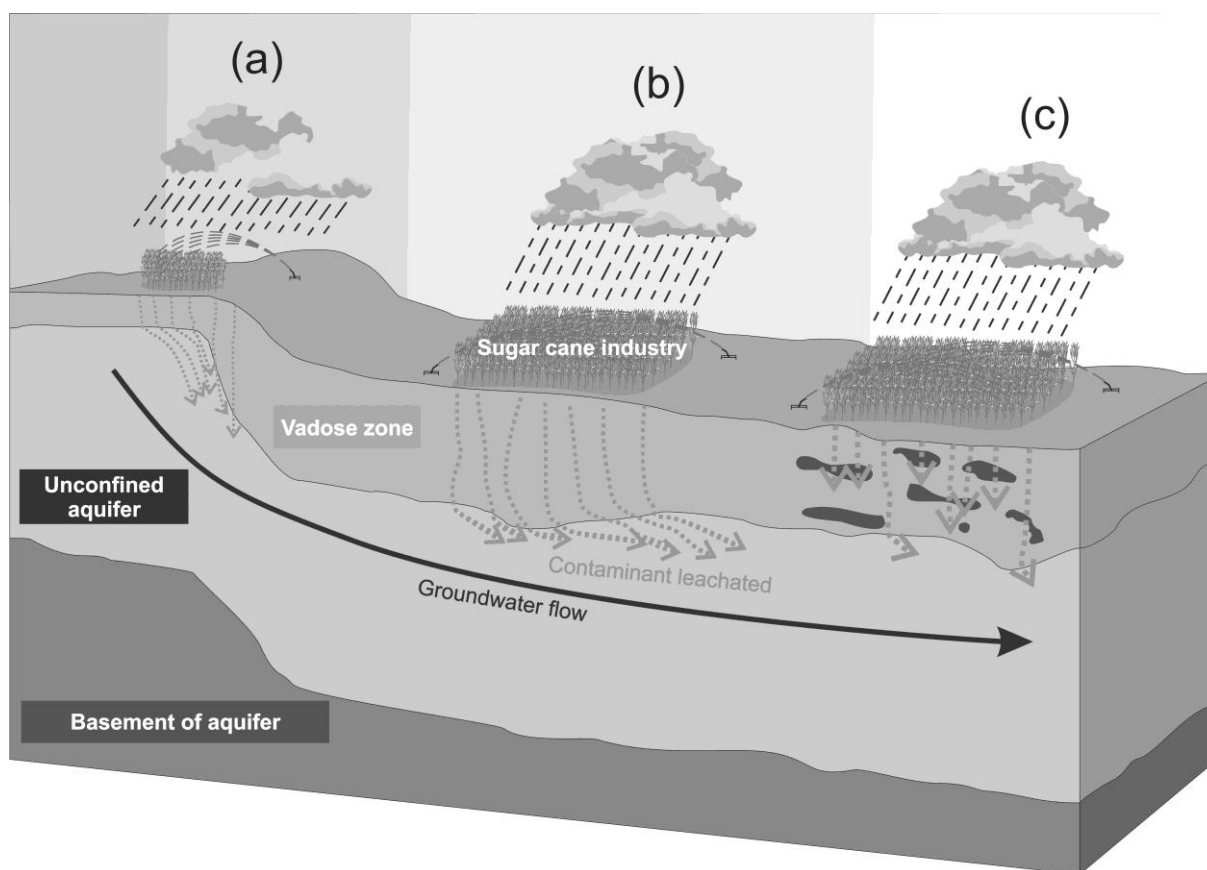


Fig.1: Different scenarios involving contamination of shallow aquifers in arable perimeters: a. Thin unsaturated zone; b. Thick unsaturated zone; c. Unsaturated zone with lithological clay percentage.

For this kind of analysis, the contaminant load is considered as having vertical displacement in the vadose area and, when inserted in the aquifer, it is subject to the

movement of groundwater. In this case, leachate contaminant refers to chemical surpluses from additional fertilization not assimilated by vegetation.

Considering a broader, interdisciplinary in nature discussion, the term vulnerability of aquifers can be understood as the ease of an aquifer system to be polluted, that is, its susceptibility to be adversely affected by a contaminant load (Foster and Hirata 1993). Moreover, according to these authors, this ease is the function of the hydraulic inaccessibility of penetration of contaminants and attenuation capacity of the strata above the saturated zone, as a result of its physical retention and chemical reactions with the contaminant. This interaction will basically determine the residence time in the unsaturated zone and the delay in the arrival of the contaminant in the aquifer, as well as the degree of attenuation, retention or disposal, before its arrival in the saturated zone.

Thus, unconfined aquifers are more susceptible to contamination when compared with confined aquifers, where the latter, by definition, has its upper limit characterized by an impermeable or semi-impermeable layer. On the other hand, unconfined aquifers are naturally more vulnerable to contamination, when they do not have a thick layer of coverage.

In this context, geophysics has been providing its contributions to sustainable environmental planning of groundwater, mainly through geoelectrical surveys. As an example, we have electrical conductivity maps, which are directly correlated with soil clay content, the main component for the retention and/or deceleration of contaminants towards groundwater levels, also favoring biodegradation processes (Kirsch 2009).

Yet according to Kirsch (2009), the protection of a hydro-geological source is associated primarily with the existence of overlying protective layers with sufficient thicknesses and/or with reduced hydraulic conductivity. These conditions would provide a delay on vertical movement of the infiltrated solutions, in addition to greater conditions of degradation of any contaminant mass through bio-physical-chemical reactions (Fetter 1993, Feitosa *et al.* 2008). In this respect, the geoelectrical parameter of the longitudinal conductance from geoelectrical models *resistivity versus thickness*, allows indirect measurement of thickness and presence of clay layers overlaying the aquifer.

The longitudinal conductance (S), in the theory of stratified conductors, is characterized by the ratio of thickness and resistivity of the environment considered, being widely used in the evaluation of groundwater protection capacity (Henriet 1976; Kalinski *et al.* 1993; Braga *et al.* 2006; Braga and Francisco 2014). In the interim, the hydraulic conductivity and/or clay contents in sediments can be evaluated by their electrical resistivity, assuming that the smallest resistivities are related to higher percentages of clay minerals

and/or smaller hydraulic conductivity, which interferes with the percolating time of penetrating solutions in the environment (Henriet 1976; Kalinski et al. 1993; Braga and Francisco 2014).

The study area is located on the east coast of the State of Rio Grande do Norte, Northeastern Brazil, having as geographic boundary the basin of the Catu River, with approximately 200 km² and occupying parts of the municipalities of Canguaretama, Goianinha, Tibau do Sul and Vila Flor (fig.2). The area mentioned is widely used for the cultivation of sugar cane, with a view to the production of ethanol and sugar, and it is subject to supplementary NPK-type chemical fertilization (Lucena et al. 2013a).

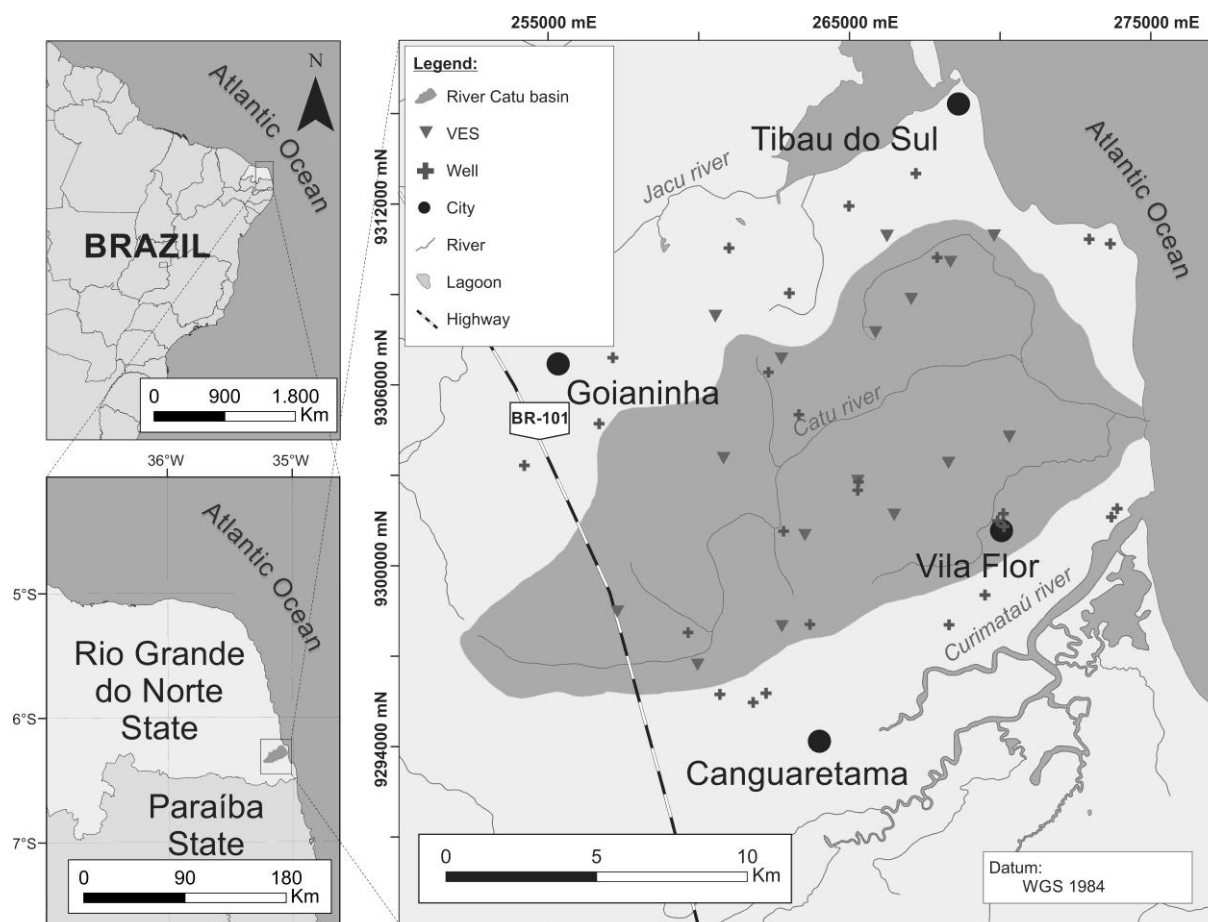


Fig.2: Location of the basin of Catu River-RN, Northeastern Brazil.

In view of the context reported, the main purpose of this research is to quantify the level of protection and the vulnerability of the Barreiras Aquifer in the area mentioned, which is the main, regional groundwater source and of a unconfined hydraulic character. Such quantification will be performed with the preparation of cartographies based on hydro-geophysical data, particularly information of constructive and lithologic profiles of wells, in

addition to the application of geoelectrical parameters, from inverse models of vertical electrical sounding.

Geological and hydrogeological context

The regional stratigraphy consists of two basic sequences: an outcropping and a non-outcropping. The non-outcropping sequence is represented by Precambrian crystalline basement and sedimentary rocks of Mesozoic basin (considering profile information of regional wells), while the outcropping sequence comprises sedimentary Cenozoic rocks of the Barreiras Formation (tertiary-quaternary in age) and quaternary coverage (Nogueira 1982, Bezerra 1998, Lucena 2005; Angelim et al. 2006, Rossetti et al. 2011; Lucena et al. 2013b; Bezerra et al. 2014). The crystalline basement is represented by granite, granodiorite, migmatite and gneisses correlated to the Caicó Complex (Bezerra 1998; Lucena 2005). The Mesozoic sediments consist of a sandstone unit (baseline) and other carbonate (top), although the latter with sandstone intercalations (Lucena 2005). This sequence has been correlated to the deposits of the Beberibe (base) and Gramame-Maria Farinha (top) formations, respectively several sandstones and carbonate rocks, stratigraphically inserted in the coastal sedimentary basin Pernambuco-Paraíba (Bezerra et al. 2001; Rossetti et al. 2011).

In the outcropping sequence, the Barreiras Formation consists of a set of siliciclastic Cenozoic lithologies, involving from argillite to conglomerates, although clay sandstones are predominant, which are found discordantly overlapping Precambrian rocks of the crystalline basement or Mesozoic sediments (Nogueira 1982; Lucena 2005). Heaving the Barreiras Formation, we have all Quaternary sedimentation, which can differentiate a sub-recent sedimentation (beachrocks and fixed dunes) and recent (sandy coverage, silts, moving dunes, in addition to the sediments of current beaches and mangroves). This terminology, empirical in nature, is used to differentiate the lithostratigraphic units of the Quaternary which are subject or not to the current sedimentation processes (Lucena 2005). The figure 3 presents the geological outline of the study area (adapted from Angelim et al. 2006).

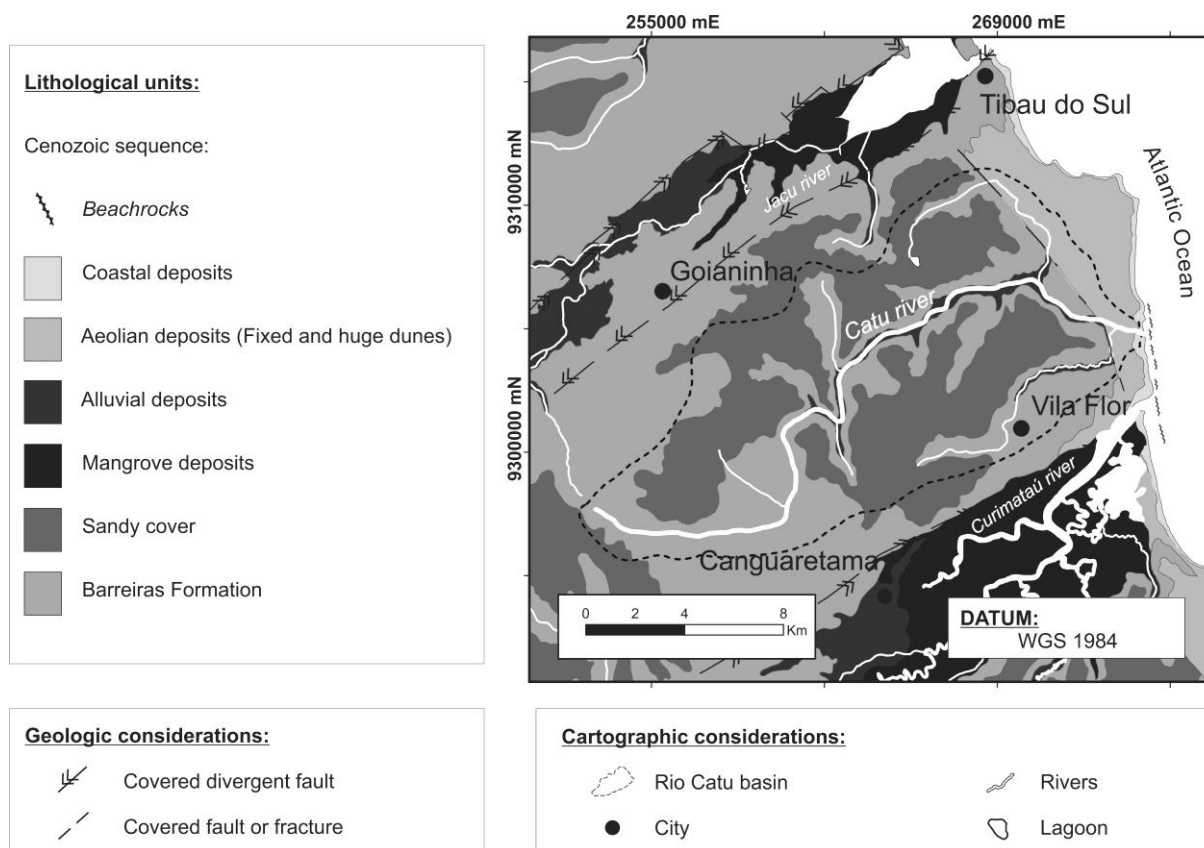


Fig.3: Geological outline of the area of the basin of Catu River-RN and vicinity (adapted from Angelim et al. 2006).

The Barreiras Aquifer, homonym of the stratigraphical unit, has as its inferior limit in the area of study the top of the non-outcropping carbonatic Mesozoic sequence, which was identified in the drilling as being formed by sandy-clay and clay sediments of calciferous composition and low hydro-geological potentiality (Lucena 2005; Silva et al. 2014). As for its hydraulic condition, such source is predominantly unconfined, which is evidenced by aspects of broad interaction with surface drainage (the aquifer has natural discharges towards the drainages, besides regional flow towards the coast line), as well as the results of performed aquifer tests. The latter revealed values of the order of 2.6×10^{-3} to 3.3×10^{-3} m²/s of hydraulic transmissivity (T) and of 5.98×10^{-5} to 7.58×10^{-3} m/s of hydraulic conductivity (K), considering an average saturated thickness of 40 meters. The overlying unsaturated zone, associated with some of the reported quaternary coverage, is composed by sediments or sedimentary rocks of sandy and sandy-clay composition.

The waters of the Barreiras Aquifer in the area are predominantly sodic chlorinated and have, in a universe of 40 analyzed samples, contents of ammonium nitrogen ranging from 0.01 to 2.86 mg/L (11 samples), nitrite contents ranging from 0.03 to 0.63 mg/L (3 samples) and 37 samples having contents of nitrate ranging from 0.05 to 6.67 mg/L. (Lucena et al. 2013a).

Methodology

The methodology used in this study was based on the utilization of electric geophysical methods to analyze the level of protection of the Barreiras Aquifer in the area of the hydrographic basin of the Catu River, mainly inverse models of vertical electrical sounding (VES) and values of longitudinal conductance (Orellana 1972). Added to that, such data was confronted and evaluated as a whole with the use of the *GOD* methodology (Foster and Hirata 1993; Foster et al. 2006) for the analysis of the local aquifer's vulnerability. Those methodological procedures also used information from available well profiles, which are partially or totally cutting the Barreiras Aquifer. The geoelectrical surveying, in particular, was mainly performed in places lacking or even having no information of wells.

The geoelectrical methods, in their essence, are based on the determination of the electric resistivity of the materials that, together with the dielectric constant and the magnetic permeability, basically express the electromagnetic properties of soils and rocks (Orellana 1972; Koefoed 1979). The electric resistivity of those materials indirectly provides the characteristics of the medium (level of alteration, fractures, saturation, lithotypes, among other aspects), having Ohm's Law as its theoretical foundation. The latter states that the current density (J), at any point of a homogeneous isotropic conductor is proportional to that derivative from the potential in relation to the distance (dV/dL), and the proportionality factor is represented by the electric conductivity (σ), as seen in equation 1:

$$J = -\sigma \frac{dV}{dL} \quad (1)$$

The resistivity, on its turn, is the difficulty a certain material imposes to the passage of an electric current, corresponding to the inverse of the conductivity. Since the resistivity (ρ) is given in ohm m (or $\Omega \cdot m$), the conductivity (σ) is given in Siemens/m (or S/m), as those two parameters are inversely related.

In practical terms, considering that in the geophysical methodology of the electroresistivity the difference of potential between two points was measured, while the measurement of the electric current demands the closing of the circuit, systems in quadripoles are adopted as a practical device for measuring resistivity (Orellana 1972).

The geoelectrical technique used was the vertical electric sounding (VES), which basically consists of injecting electric current in the medium through the current electrodes (A and B) and measuring the difference of potential between the potential electrodes (M and N). Thus, by introducing an electric current (I) in the subsoil through two electrodes (AB), a

potential difference (ΔV) is produced, which, on its turn, is measured by a second pair of electrodes (MN). The value measured for the difference of potential is a function of the apparent resistivity of the subsoil and of the geometric arrangement of the electrodes (K), where the investigated depths are directly proportional to the spacing between the electrodes (Orellana 1972). As the electrodes are arranged as "Schlumberger's", the potential electrodes are positioned between the current electrodes so that the MN spacing must be at the most one fifth of the AB spacing. In general, the value of the resistivity (ρ) of the medium can be calculated by the following equations (Orellana 1972; Koefoed 1979; Reynolds 1997):

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

$$\rho_a = k_{\text{Schl}} \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

$$k_{\text{Schl}} = \frac{\pi \left(\frac{\overline{AB}}{2} \right)^2}{\overline{MN}} \left[1 - \frac{\overline{MN}^2}{4 \left(\frac{\overline{AB}}{2} \right)^2} \right] \quad (4)$$

Where:

ρ_a = apparent resistivity;

ΔV = difference of potential;

I = electric current;

K_{Schl} = Geometrical factor for the arrangement of Schlumberger electrodes;

\overline{AB} = distance between electrodes A and B;

\overline{MN} = distance between electrodes M and N.

The adopted geoelectrical model, compatible with the geological reality of the area, has the following characteristics:

- i. The subsoil is formed by a sequence of layers with finite thickness (E_i), excepted for the last one which is given as infinite;
- ii. Each layer is admitted as electrically homogeneous and isotropic, characterized by a resistivity (ρ_i);
- iii. The separation interfaces between the layers are plane and horizontal and parallel to the surface of the terrain.

16 geoelectrical soundings were made in the area of study and its adjacencies, obtaining resistivity curves in bi-logarithm graph of " $\rho_a \times AB/2$ " for each central point of VES as a result, which allowed the subsequent definition of local inverse interpretative models of

resistivity versus thickness. As for the quantitative analyses of the geoelectrical stratigraphy in the subsurface, data on the geoelectrical calibrations obtained by Lucena (2005) were used. Such calibrations consisted of performing a VES contiguous to a well of known lithologic profile, where the obtainment of the calibrated model consisted in setting the values of thickness, according to the information presented in the description of the hydrostratigraphic profile of the well, looking for the best adjustment possible of an interpreted curve (inverse model) to the filed data, aiming to obtain representative values of resistivity of the substrata in subsurface. The software used to obtain the reported inverse models was the IPI2Win (Bobachev et al. 2000).

The geoelectrical models were equally applied for the calculation of longitudinal conductance (Maillet, in Orellana 1972), due to their applicability to hydrogeological studies (Henriet 1976; Kirsh 2009; Panty and Francisco 2014). That geoelectrical parameter is based on a current flow parallel to the stratifications, where the resistance of the considered layer, taking a straight prism of square transversal section and sides of unit length, is given by:

$$R_i = \frac{\rho_i L}{S} = \frac{\rho_i}{E_i \cdot 1} = \frac{\rho_i}{E_i} \quad (5)$$

Using the inverse parameter of the resistance (conductance), as it has an additive property, the conductance S_i will be given by:

$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \quad (6)$$

For the set of the first n layers of the section, we then have:

$$S_i = \sum_i \frac{E_i}{\rho_i} \quad (7)$$

The longitudinal conductance (S) thus highlights a relationship of thickness and resistivity of the layers in subsurface. In the specific case of zones of aquifers, high relative values of S for overlaying horizons will evidence a more protected saturated area in view of possible contaminating loads in vertical flow. That observation is due to the fact that we would then have a high thickness of overlaying layer or a decrease of the value of the electrical resistivity of that same layer, associated to clayey sedimentary rocks (rocks of smaller hydraulic conductivity). In this study, that was applied to the unsaturated area, since the Barreiras Aquifer has predominantly unconfined local hydraulic nature, as reported.

The *GOD* methodology was used in the analysis of the vulnerability of the aquifer (Foster and Hirata 1993; Foster et al. 2006). Such methodology allows the analysis of the susceptibility of an aquifer to contamination by the interaction of the following parameters:

- *Groundwater hydraulic confinement*: level of hydraulic confinement, that is, the condition of the aquifer;
- *Overlaying strata*: occurrence of lithological substrata;
- *Depth to groundwater table*: depth of the groundwater table, that is, it corresponds to the unsaturated thickness overlaying the aquifer.

The estimate of the vulnerability index involves three stages:

1. Identification of the level of hydraulic confinement of the Barreiras aquifer in the area and attribution of the corresponding value, from 0.0 to 1.0;
2. Knowledge of the lithological characteristics, which will be provided, in this case, by data of wells and/or geoelectrical soundings, highlighting the fact that the attributed weight (ranging from 0.4 to 1.0) was considered due to the thickness of occurrence of the respective lithology;
3. Identification of the depth of the level of water and attribution of the value that ranges from 0.6 to 1.0.

In that context, the vulnerability index is obtained by multiplying the values attributed to each parameter ($G \times O \times D$). The result can range from 0 to 1, indicating the classes of natural vulnerability as neglectable, low, average, high or extreme (Fig.4). The *GOD* methodology is used in several studies, with quite satisfactory results, mainly due to the ease to obtain and interact the three parameters involved (Mendonza and Barmen 2006; Debernadi et al. 2008; Martinez-Bastista et al. 2010; Fernandes et al. 2014). In this study such punctual vulnerability indices were obtained from well data and also from inverse geoelectrical models.

The cartographies for the analysis of the protection level, based on the parameter of longitudinal conductance, and the vulnerability of the Barreiras Aquifer in the area of study, were obtained from the geoelectrical models of VES and of the local indices of vulnerability, by interpolation and plotting of grids of those data, using the SURFER software (2002). That process of interpolation and gridding was used by the Kriging methodology, which uses a spatial dependence between the observations, with minimum variance and errors (Christakos 2000; Loureiro and Lisboa 2011).

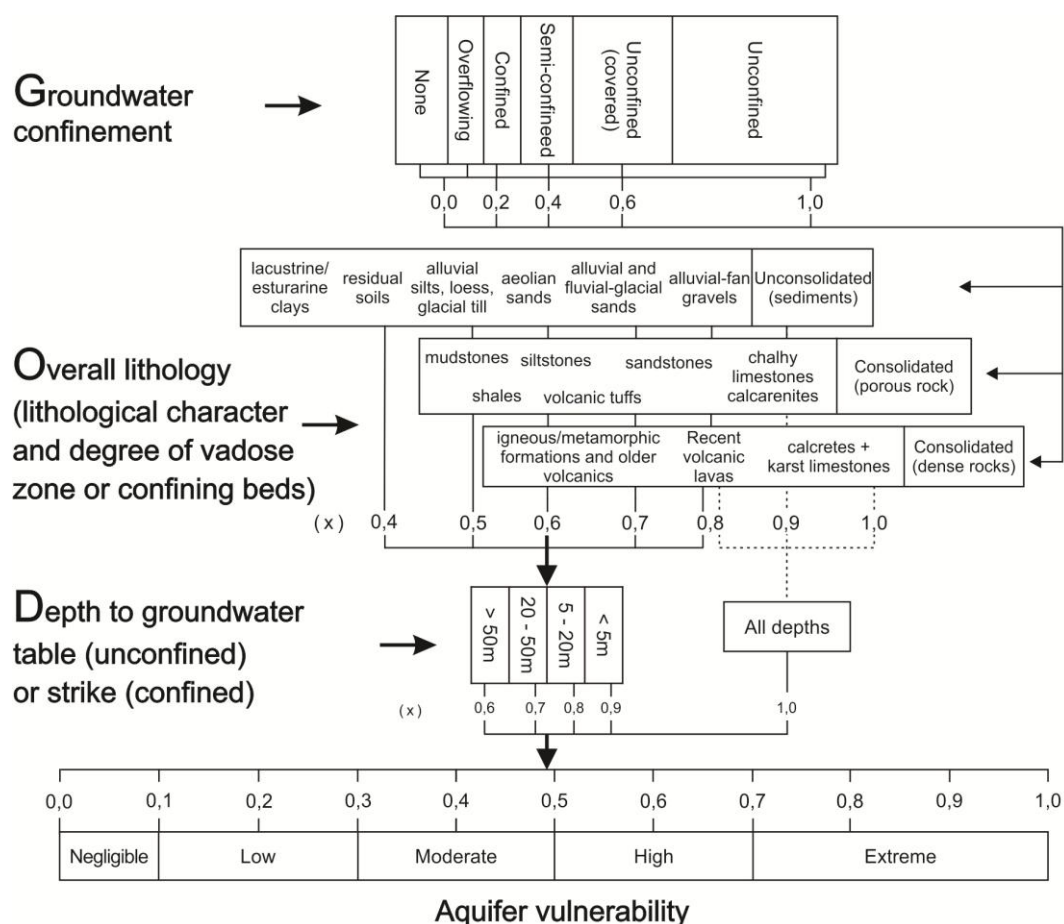


Fig.4: Flowchart to obtain natural vulnerability indices of aquifers, according to the GOD methodology (Foster and Hirata 1993; Foster et al. 2006).

Results and discussion

The interpretations of the vertical electrical soundings-VES, through the respective inverse models of resistivity *versus* thickness, allied to geoelectrical calibrations, allowed obtaining information about the local hydrostratigraphy, with emphasis on the lithological aspects and the thickness of the unsaturated zone-UZ. The figure 5 shows data of geoelectric calibration in the context of the Barreiras Aquifer, adapted from Lucena (2005). The values of unsaturated thickness from the inverse models of the VES are shown in table 1.

As for the qualitative analysis, mainly in the association of geoelectrical layers with lithological layers, the VES were consistent with the local hydrogeological context, marked by the well profiles. Resistivity variations were observed in the most superficial levels between 140 and 10.500 Ω m associated to the variation of lithologies, predominantly clayey and sandy, respectively, as well as geoelectric responses congruent with the saturation zone, having resistivities from 500 to 900 Ω m for the sandiest layers. The electrode openings used allowed for an investigation depth covering up to the hydro-geological base of the Barreiras

Aquifer, represented by the top of the regional carbonate sequence and of conductive geoelectric nature (resistivities in the order of $50\Omega\text{m}$).

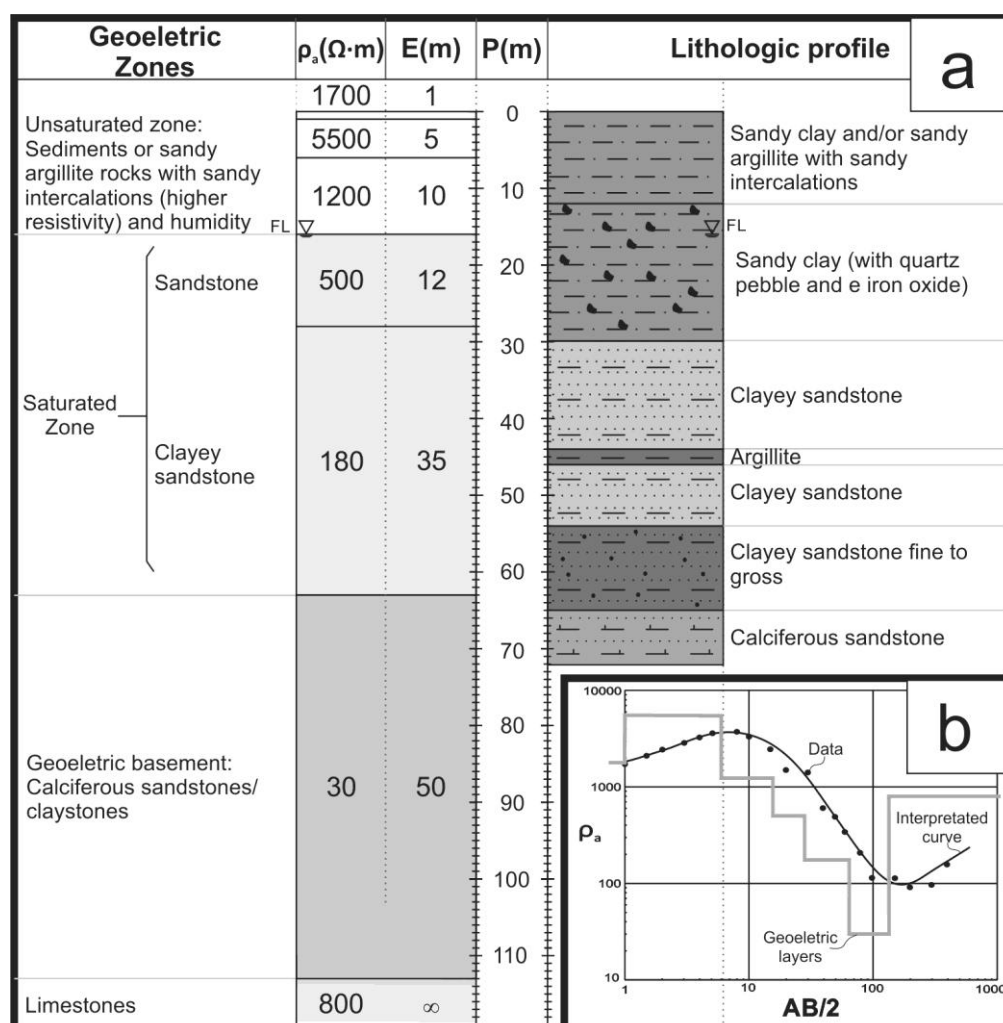


Fig.5: Geoelectric hydrostratigraphy of calibration: **a.** graph represents the adjustment of the modeled curve to the field data; **b.** the phreatic level (FL) is at 16.0 meters of depth (adapted from Lucena, 2005).

The reported inverse models of the VES (geoelectrical stratigraphy), particularly for the UZ, are shown in table 2, as well as the respective calculation of the longitudinal conductance, elaborated according to equation 7.

Data from the calculation of longitudinal conductance, shown in table 2, was submitted to an interpolation and gridding, to allow obtaining a cartography of longitudinal conductance. Notwithstanding the fact that such parameter is given by the quotient between the resistivity and thickness factors, particularly in this study of the unsaturated zone, a medium with reduced values of S is associated with relatively reduced thickness or high resistivities. The latter, compatible with sediments or sedimentary rocks of predominantly sandy composition. That lithotype provides higher infiltration rates, reflecting a higher

vertical permeability, making the aquifer more susceptible of being reached by possible contaminating loads. As for the subareas in which the S parameter is higher, we have a more protected aquifer, since it has higher thickness overlaying it. That situation grants higher filtration of percolation of the contaminating load, protecting underground waters. Alternatively, the high value of S can be related to reduced resistivities of the UZ, a fact that is characteristic of predominantly clayey lithologies, with smaller vertical permeability. In that case, the hydraulic accessibility to the saturated zone by a certain contaminating load is hindered.

Tab.1: UTM (m) coordinates of the VES and their respective values of thickness of the unsaturated zone.

VES	UTM X (m)	UTM Y (m)	Unsaturated thickness (m)
1	259948	9296646	19,6
2	257278	9298415	66,0
3	262757	9297930	32,0
4	260539	9308256	12,0
5	266251	9310920	17,0
6	269823	9310928	25,5
7	268370	9310058	4,7
8	270330	9304236	25,0
9	268304	9303375	6,5
10	266500	9301640	11,2
11	263523	9300966	24,6
12	260812	9303524	7,0
13	262745	9306840	20
14	265875	9307718	34
15	267062	9308822	3,0
16	265282	9302766	19,5

In that context, the map in figure 6 shows the variation of the values obtained from the interpolation and gridding of the data of S , with values ranging from 5mS to 55mS. Adopting the isoline of 20mS as intermediate reference value, it is seen that, in general, the Barreiras Aquifer is less protected at the Northeast and East-Central sections of the map, with longitudinal conductances around 10mS, to the detriment of the values of S higher than 30mS in the Southwest section, associated with a higher level of protection of the source.

Tab.2: Geoelectrical stratigraphy for the 16 VES and the respective values of longitudinal conductance; h_1 to h_4 and ρ_1 to ρ_4 represent thicknesses and resistivities of the layers of the UZ from the most superficial to the deepest one, respectively.

VES	Unsaturated thickness (m)				Resistivity (Ohm.m)				S (mS)
	h_1	h_2	h_3	h_4	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	
1	1,6	18,0	-	-	460	1100	-	-	19,8
2	0,5	8,5	57,0	-	400	3000	1150	-	53,6
3	0,5	0,5	1,0	30,0	450	2200	200	900	39,7
4	2,5	2,5	7,0	-	1350	300	4500	-	11,7
5	2,0	8,0	7,0	-	1000	600	1300	-	20,7
6	0,5	0,5	2,5	22,0	1100	2200	1200	3300	9,4
7	0,7	4,0	-	-	980	3400	-	-	1,9
8	1,0	2,0	12,0	10,0	2000	3300	850	2700	18,9
9	0,5	6,0	-	-	500	1400	-	-	5,3
10	1,2	4,0	6,0	-	2000	1000	2000	-	7,6
11	0,6	12,0	12,0	-	1500	950	4000	-	16,0
12	0,5	0,5	6,0	-	300	2500	450	-	15,2
13	10,0	10,0	-	-	600	2000	-	-	21,7
14	2,0	2,0	30,0	-	450	140	1400	-	40,2
15	0,5	0,5	2,0	-	300	10000	3000	-	2,4
16	1,0	4,0	14,5	-	10500	3000	2000	-	8,7

As this is an analysis of level of protection of a unconfined aquifer from values from the geoelectrical survey, however, the sensibility of such methodology is seen in the occurrence of pluviometric precipitations prior to the field survey. In that aspect, obtaining of geoelectrical data (and the subsequent determination of longitudinal conductances) on days after the occurrence of pluviometric precipitations can lead to ambiguous geoelectric interpretations, mainly with regard to values of apparent resistivities of layers of the unsaturated zone and their respective associated lithologies. Thus, apparently reduced values of resistivities can be associated with the presence of additional residual humidity in the unsaturated zone and not only due to the occurrence of layers with more clay which would provide greater protection to the aquifer.

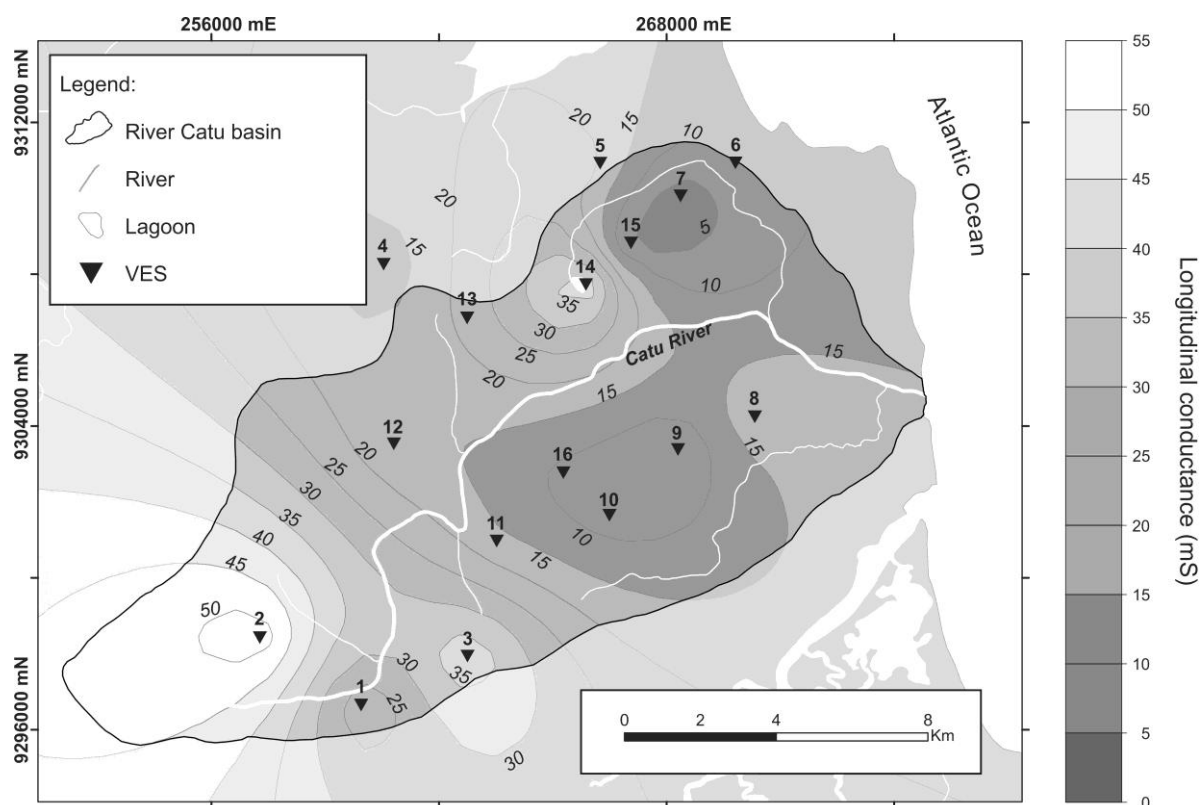


Fig.6: Map of the longitudinal conductance (S) in the area of the hydrographic basin of the Catu River (RN); the isolines show the values of S in mS (10⁻³ Siemens).

As this is an analysis of level of protection of a unconfined aquifer from values from the geoelectrical survey, however, the sensibility of such methodology is seen in the occurrence of pluviometric precipitations prior to the field survey. In that aspect, obtaining of geoelectrical data (and the subsequent determination of longitudinal conductances) on days after the occurrence of pluviometric precipitations can lead to ambiguous geoelectric interpretations, mainly with regard to values of apparent resistivities of layers of the unsaturated zone and their respective associated lithologies. Thus, apparently reduced values of resistivities can be associated with the presence of additional residual humidity in the unsaturated zone and not only due to the occurrence of layers with more clay which would provide greater protection to the aquifer.

Similarly, geoelectric surveys carried out at the end of the period of annual drought in the area can induce to geoelectric interpretations that result in overestimated values in terms of thickness of the UZ. Such observation is corroborated with high infiltration speeds in the vadose zone determined by Lucena et al. (2013a) in infiltration tests performed in the area of the Catu River basin (RN).

Based on the geoelectrical data presented herein, we can additionally propose a classification of the level of protection of the Barreiras Aquifer in graphic terms, correlating

the parameters of thickness and representative resistivity of the unsaturated zone, besides the values of longitudinal conductance themselves (fig.7). That ternary graphic configuration for the analysis of aquifer protection was initially proposed by Braga (2008), although that author considered the presence of overlaying aquitard to the analyzed aquifer, to the detriment of a context of unconfined aquifer of this study.

In that aspect, it is highlighted that, to the detriment of individual values of resistivity of the different geoelectrical layers of the unsaturated zone, a single representative resistivity was considered, adopting the concept of pseudo-anisotropy described by Orellana (1972). This author proposes that the different layers, considered in the mathematical-geophysical model as homogeneous and isotropic, may behave as a single anisotropic medium of resistivity ρ_m .

Therefore, a value of representative resistivity of the whole UZ was adopted, corroborating the obtained values of S , together with the respective unsaturated thickness (fig.7). In the aforementioned graphic analysis, fields of low, intermediate, and high levels of protection were delimited, in line with the configuration of the map of longitudinal conductance (with the adopted intermediate value of 20mS), besides geoelectrical calibrations.

Analyzing the reported graph, we see the preponderance of the parameter of thickness of the unsaturated zone in terms of intrinsic physical protection of the source. On the other hand, for situations of approximate equivalence of that parameter in the different VES, the positioning of those in the graph was determined by the lithological composition (interpreted in the inverse models and based on geoelectrical calibrations). In that case, taking VES-05 and VES-16 as examples, we observe that they are equivalent in the dimensional aspect of the unsaturated thickness, however, their classifications diverge to the detriment of the values of resistivity, as the identified UZ in VES-05 is compatible with a composition higher in clay compared to that determined in VES-16. The preponderance of the values of thickness of the UZ in the classification of the classes occurs, on its turn, taking VES-10 and VES-11 as examples. In that case, we have an equivalence in the values of resistivity, however, their classifications differ due to the first having a thinner UZ.

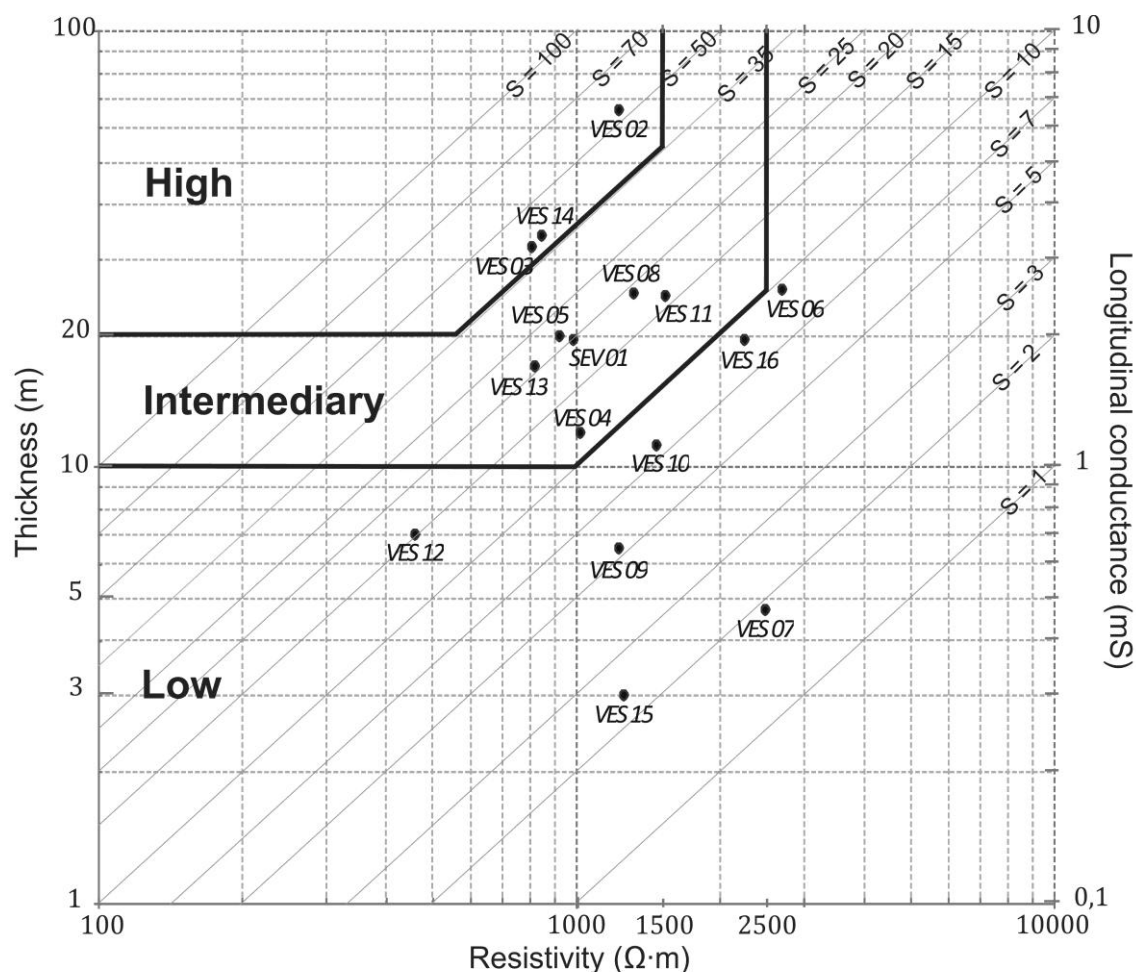


Fig.7: Relation between "longitudinal conductance x thickness x resistivity" of the UZ and the level of intrinsic protection of the Barreiras Aquifer, area of the hydrographic basin of the Catu River (RN) (adapted from Braga 2008).

The determination of the indices of local vulnerability of the Barreiras Aquifer, on its turn, although based on the *GOD* methodology (Foster and Hirata 1993; Foster et al. 2006), was defined based on hydrogeological and geophysical data, to the detriment of only hydrogeological information of the original conceptualization of the method. Consequently, the aforementioned parameters for the determination of the vulnerability indices were obtained from available profiles of wells and also from information of the inverse models of the geoelectrical soundings. The adoption of that multidisciplinary methodology for the assessment of the vulnerability resulted from the fact that in some local subareas the information of wells was scarce or even inexistent, situations in which the geoelectrical sounding were preferentially performed, as reported.

Tab.3: UTM Coordinates (m) of the wells and the respective values of thickness and predominant lithological composition of the unsaturated zone in the area of the Catu River basin (RN) and adjacent area.

Well	UTM N (m)	UTM E (m)	Unsaturated Thickness (m)	Lithological character
1	9295414	261805	39.5	Sandstone
2	9295700	260700	38.1	Argillite
3	9295730	262228	31.1	Sand, clay and sandstone
4	9297750	259650	27.0	Sandstone
5	9298000	263700	30.3	Clay and sandstone
6	9298000	268300	1.8	Clayey sand
7	9299000	269500	6.4	Clay
8	9301108	262828	4.8	Sand and argillite
9	9301274	270137	26.6	Sand, clay and argillite
10	9301458	269926	7.5	Sandy clay
11	9301600	273700	19.2	Argillite
12	9301700	270100	21.9	Sandstone
13	9301874	273886	41.4	Sand, sandstone and argillite
14	9302466	265282	19.5	Sand and silty clay
15	9302750	265294	17.0	Silt, sandstone and argillite
16	9303300	254200	27.4	Argillite
17	9304700	256700	31.8	Argillite
18	9305004	263328	28.3	Sandstone
19	9306400	262300	23.0	Silt
20	9306856	257150	3.6	Sandy-clayey soil and clay
21	9309000	263000	33.3	Argillite
22	9310196	267915	28.9	Argillite and sandstone
23	9310500	261000	11.4	Sandstone
24	9310644	273679	29.4	Sand-silty clay
25	9310800	272950	19.9	Sand and sandstone
26	9311900	265000	5.7	Sandstone
27	9313000	267200	24.5	Argillite

Tab.4: Weighing factors associated with the ranges of apparent resistivity and characteristics of the considered lithological medium.

Interval of apparent resistivity (ρ), in $\Omega \cdot m$	Weighing factor	Characteristics of the lithological medium associated to the weighing factor
$\rho < 1000$	0.5	Sediments and/or sedimentary rocks of mainly clayey composition;
$1000 < \rho < 2500$	0.6	Sediments and/or sedimentary rocks of sandy-clayey to sandy composition, respectively associated to smaller and bigger values of resistivity in the considered interval;
$\rho > 2500$	0.7	Sediments and/or sedimentary rocks of gross sandstone to conglomerate composition.

Tab.5: Attributed weighing factors and GOD indices of local vulnerability to wells and VES; the parameters G, O and D refer to the type of occurrence of the aquifer, type of lithology of the UZ and depth of the water table or thickness of the UZ, respectively.

DATA	Parameters			GOD index
	<i>G</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	
Well-01	1	0,7	0,7	0,5
Well-02	1	0,5	0,7	0,4
Well-03	1	0,6	0,7	0,4
Well-04	1	0,7	0,7	0,5
Well-05	1	0,6	0,7	0,4
Well-06	1	0,6	0,9	0,5
Well-07	1	0,5	0,8	0,4
Well-08	1	0,6	0,9	0,5
Well-09	1	0,6	0,7	0,4
Well-10	1	0,6	0,8	0,5
Well-11	1	0,5	0,8	0,4
Well-12	1	0,7	0,7	0,5
Well-13	1	0,6	0,7	0,4
Well-14	1	0,6	0,8	0,4
Well-15	1	0,6	0,8	0,5
Well-16	1	0,5	0,7	0,4
Well-17	1	0,5	0,7	0,4
Well-18	1	0,7	0,7	0,5
Well-19	1	0,5	0,7	0,4
Well-20	1	0,6	0,9	0,5
Well-21	1	0,5	0,7	0,4
Well-22	1	0,6	0,7	0,4
Well-23	1	0,7	0,8	0,6
Well-24	1	0,6	0,7	0,4
Well-25	1	0,7	0,8	0,6
Well-26	1	0,7	0,8	0,6
Well-27	1	0,5	0,7	0,4
VES-01	1	0,6	0,8	0,5
VES-02	1	0,6	0,6	0,4
VES-03	1	0,5	0,7	0,4
VES-04	1	0,6	0,8	0,5
VES-05	1	0,6	0,8	0,4
VES-06	1	0,7	0,7	0,5
VES-07	1	0,7	0,9	0,6
VES-08	1	0,6	0,7	0,4
VES-09	1	0,6	0,8	0,5
VES-10	1	0,6	0,8	0,5
VES-11	1	0,6	0,7	0,4
VES-12	1	0,5	0,8	0,4
VES-13	1	0,6	0,8	0,4
VES-14	1	0,6	0,7	0,4
VES-15	1	0,7	0,9	0,6
VES-16	1	0,6	0,8	0,5

For well data (tab.3), the parameters evaluated in the *GOD* index of vulnerability (thickness of the UZ, lithology of the UZ and type of aquifer) were directly obtained from the respective profiles. However, as for the analysis of those parameters based on geophysical data, calibration and geoelectrical information was used, emphasizing the unsaturated zone. In

this case, the parameter of the *GOD* methodology associated to the lithological characteristics was established with weighing factors ranging from 0.5 to 0.7, according to its content being higher in clay or sand, respectively (tab.4). The table 5, on its turn, shows the natural vulnerability indices of the Barreiras Aquifer, considering it as having unconfined hydraulic character along the whole area of study.

The figure 8 shows an integralized synthesis of the analysis of natural vulnerability of the Barreiras Aquifer. In the Northeast and Southwest ends we have the biggest and the lowest indices of vulnerability, respectively, with greater influences of the dimensional aspect of ZNS. The observations taken based on the map of longitudinal conductance were corroborated by the cartography about the *GOD* vulnerability index. In that case, considering the index of 0.45 as intermediate, we can see areas that are more susceptible to contamination (*GOD* index equal to or superior than 0.50) and those with more conditions of natural protection (*GOD* index smaller than or equal to 0,40). In that context, the general vulnerability for the Barreiras Aquifer in the area, defined by the application of the *GOD* methodology, is classified as moderate to high.

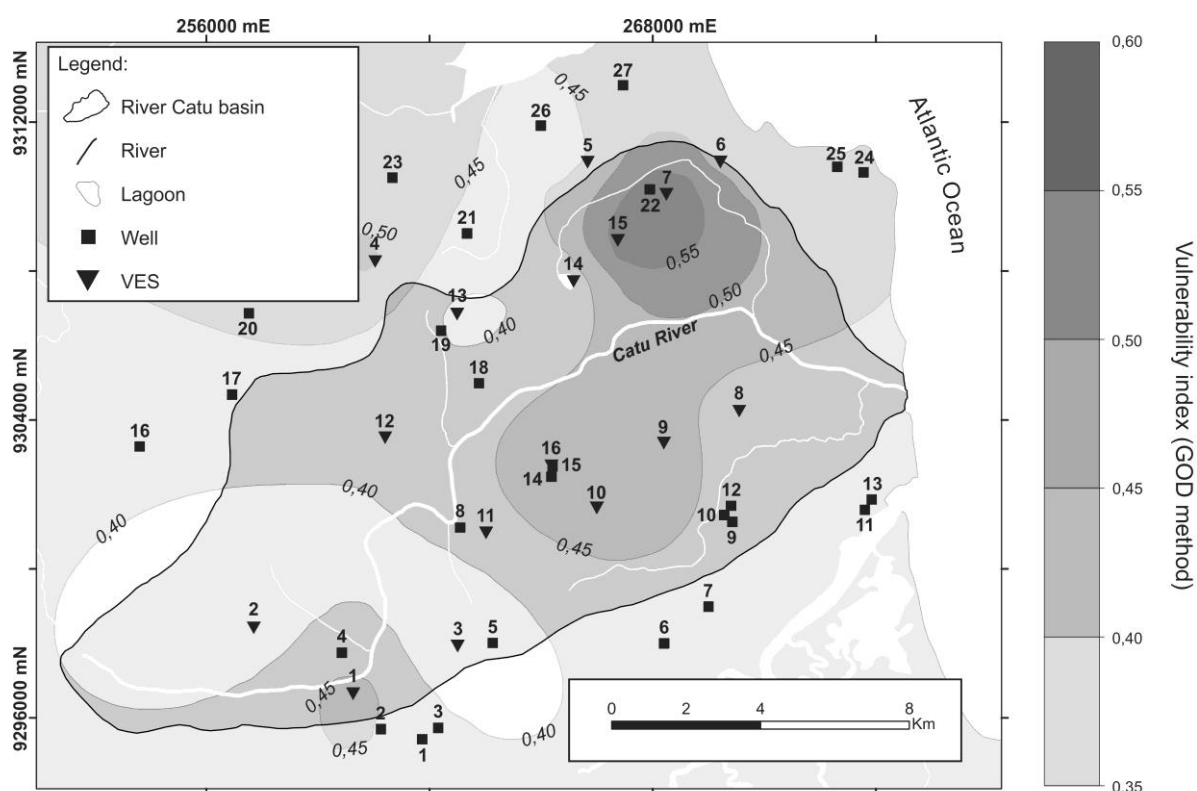


Fig.8: Map of the vulnerability indices of the Barreiras Aquifer, based on the GOD methodology (Foster and Hirata 1993; Foster et al. 2006), in the area of the hydrographic basin of the Catu River (RN).

In view of the non-invasive applicability of the geophysical method used, particularly, the obtained results were promising as an auxiliary tool regarding a sustainable

hydrogeoenvironmental management of the studied area. Such methodology, in addition to its adoption by governmental agencies managing hydro resources, can equally contribute in the agribusiness, since it can subsidize the optimization in the use of complementary fertilization. That optimization would arise from the use of more or less quantitative of fertilizers, although considering their capacity of assimilation by the considered vegetable coverage, in areas naturally more or less protected in terms of their underground waters, respectively.

Conclusions

In conceptual terms, we can consider that, even though within the same conjuncture regarding the possibility of degradation of underground sources, the terminologies of protection level and vulnerability of the aquifer have, respectively, connotations from classic geophysical and hydro-geological analyses. In that context, the possibility of contamination of the Barreiras Aquifer in the area of study was considered derived from the lixiviation of excessive chemical fertilizers, with highlight to the nitrogenized ones, used as fertilizer for the cultivated perimeters in the area. That observation is supported by local concentrations of nitrate exceeding 5 ml/L, already denoting a tendency to contamination of the underground waters, added to the fact that the sugarcane crops and the consequent use of complementary fertilization used in the area occupies an area exceeding 90% of the area being studied.

The map of longitudinal conductance, individually, emphasized protection levels that the overlaying physical medium, associated with the unsaturated zone, provides the underground waters, considering the unconfined local hydraulic nature of the aquifer. Taking 20mS as the intermediate value, places that are more and less susceptible to contamination were identified, with 10mS and 30mS, respectively. In the graphic representation of that geoelectrical parameter, three fields were proposed and delimited in terms of degree of protection of the Barreiras Aquifer, as low, intermediate, and high level of protection, considering the respective values of thickness, resistivity and longitudinal conductance of the unsaturated zone, obtained from inverse models of VES. In general lines, the preponderance of the parameter thickness of the unsaturated zone was observed in terms of intrinsic physical protection of the source, in spite of the existence of anecdotal cases in which this condition of the aquifer is governed by the lithological composition, in other words, occurrence of resistivities associated with clayey content in the unsaturated zone.

The analysis of the degree of protection of the source was corroborated with the cartography of vulnerability of the aquifer, regarding the *GOD* methodology, although the

latter has presented better defined subareas in terms of vulnerability, in view of the greater number of samples (VES and wells). The indices of vulnerability of the order of 0.50 and 0.40 include, basically, areas of the Northeast and Southwest ends of the area being studied, which are more and less vulnerable to the possible contaminating load imposed on the surface, respectively.

Acknowledgments

The authors thank the *National Council for Scientific and Technological Development-CNPq* (Brazilian Government) for funding this research.

Reference

Angelim LAA, Medeiros VC, Nesi JR (2006) Programa Geologia do Brasil – PGB, Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte, Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte, Scale 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERN. <http://geobank.sa.cprm.gov.br>. Accessed 17 August 2015

Bezerra FHR (1998) Neotectonics in Northeastern Brazil. Ph.D. Thesis, University of London

Bezerra FHR, Amaro VE, Vita-Finzi C, Saadi A (2001) Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14:61-75. doi:10.1016/S0895-9811(01)00009-8

Bezerra FHR, Rossetti DF, Oliveira RG, Medeiros WE, Brito Neves BB, Balsamo F, Nogueira FCC, Dantas EL, Andrades Filho C, Góes AM (2014) Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. *Tectonophysics*, 614:78-90. doi:10.1016/j.tecto.2013.12.021

Bobachev AA, Modin IN, Shevnin VA (2000) IPI2Win v. 2.1, IPI_RES2, IPI_RES3, User's Guide. Geoscan-M Ltd., Moscou, 25 p.

Braga ACO, Filho WM, Dourado JC (2006) Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. *Revista Brasileira de Geofísica*, ISSN 0102-261X, 24(4)573-581. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2006000400010>.

Braga ACO (2008) Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. *Revista Brasileira de Geofísica*, ISSN 0102-261X, 26(1):61-68. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100005>.

Braga ACO and Francisco, RF (2014) Natural vulnerability assessment to contamination of unconfined aquifers by longitudinal conductance – (S) Method. *Journal of Geography and Geology*, 6(4):68-79. doi:10.5539/jgg.v6n4p68

Custódio E and Llamas MR (1983) *Hidrología subterránea*. Editorial Omega, Barcelona, Vol.1 e 2.

Debernardi L, Luca DA, Lasagna M (2008) Correlation between nitrate concentration in groundwater and parameters affecting aquifer intrinsic vulnerability. *Environmental Geology*, 55:539-558. doi:10.1007/s00254-007-1006-1

Feitosa ACF, Filho JM, Feitosa EC, Demetrio JGA (2008) *Hidrogeologia – conceitos e aplicações*, Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Laboratório de Hidrogeologia (LABHID).

Fernandes LFS, Cardoso LVRQ, Pacheco FAL, Leitão S, Moura JP (2014) DRASTIC and GOD vulnerability maps of the Cabril River Basin, Portugal. *Civil Engineering, R. Esc. Minas, Ouro Preto*, ISSN 0370-4467, 67(2):133-142. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672014000200002>.

Fetter CW (1993) *Contaminant Hydrogeology*. University of Wisconsin-Oshkosh, United States of America.

Foster SSD and Hirata RCA (1987) *Groundwater contamination*. Lima: WHO/PAHO/HPE/CEPI.

Foster SSD and Hirata RCA (1988) *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. WHO-PAHO/HPE-CEPIS, Technical Manual, Lima.

Foster SSD and Hirata RCA (1993) *Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes*. São Paulo: Instituto Geológico, 67-92.

Foster SSD, Hirata RCA, Gomes D, D'Elia M, Paris M (2006) Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Groundwater Management Advisory Team, WHO/PAHO/CEPIS and UNESCO/ROSTLAC/PHI, The World Bank, Washington, D.C.

Henriet JP (1976) Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. *Geophysical Prospecting*, 24:344-353. doi:10.1111/j.1365-2478.1976.tb00931.x

Kalinski RJ, Kelly WE, Bogardi, I, Pesti G (1993) Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers. *Journal of Applied Geophysics*, 30:161-173. doi:10.1016/0926-9851(93)90024-S

Kirsch R (2009) *Groundwater Geophysics: A tool for Hydrogeology*. Ed. Springer, Germany

Koefoed O (1979) *Geosounding Principles, 1: Resistivity Souding Measurements*. EIVESier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York.

Loureiro GE and Lisboa EG (2011) Comparação dos métodos de interpolação especial aplicados a dados pluviométricos da região hidrográfica Tocantins-Araguaia. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais. doi:10.13140/RG.2.1.1112.2721

Lucena LRF (2005) Implicação da compartimentação estrutural no Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Pirangi-RN. Dr.Thesis. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba.

Lucena LRF, Dantas JA, Medeiros AA, Rosa Filho EF (2013a) A lixiviação de fertilizantes nitrogenados na zona não saturada superior do Aquífero Barreiras – área da bacia do Rio Catu – RN. *Revista Águas Subterrâneas*, eISSN 2179-9784, 27(1)79-91. doi:http://dx.doi.org/10.14295/ras.v27i1.27338.

Lucena LRF, Oliveira Jr JG, Medeiros, WE, Queiroz, MA (2013b) The potential of the Barreiras Aquifer in the lower course of the Doce River, Rio Grande do Norte, northeast Brazil – Integration of hydrogeological and geophysical data. *Brazilian Journal Geophysics*, ISSN 0102-261X, 31(1)43-57.

Martinez-Bastida JJ, Arauzo M, Valladolid M (2010) Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal*, 18:681-698. doi:10.1007/s10040-009-0549-5

Mendoza JA and Barmen G (2006) Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. *Environmental Geology*, 50:569-580. doi:10.1007/s00254-006-0233-1

Nogueira AMB (1982) O Cenozóico continental da região de Natal. Dissertaion, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Orellana E (1972) *Prospecciongeoeletricaen corriente continua*. Ed. Paraninfo. Madrid.

Reynolds JM (1997) *An introduction to applied and environmental geophysics*. Ed. Wiley. England.

Rossetti DF, Bezerra FHR, Góes AM, Valeriano MM, Andrades-Filho CO, Mittani JCR, Tatum SH, Brito-Neves BB (2011) Late Quaternary sedimentation in the Paraíba Basin, Northeastern Brazil: Landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 300:191-204. doi:10.1016/j.palaeo.2010.12.026

Silva LRD, Lucena LRF, Vieira MM, Nascimento AF (2014) Estimativa de parâmetros hidráulicos do Aquífero Barreiras-RN a partir de análise computacional de imagens de lamina delgadas. *Revista Águas Subterrâneas*, eISSN 2179-9784, 28(2):14-27. doi:http://dx.doi.org/10.14295/ras.v28i2.27873

SURFER (2002) *Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers*. Golden Software, Inc. Golden, Colorado, USA.